

Valtteri Mäntylä

Kaukoliikenteen henkilöjunien jarrutuskykyvaatimusten tarkastaminen



Valtteri Mäntyjärvi

Kaukoliikenteen henkilöjunien jarrutuskykyvaatimusten tarkastaminen

Opinnäytetyö 2/2017

Liikennevirasto

Helsinki 2017

Kannen kuva: Simo Toikkanen

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN 2343-1741
ISBN 978-952-317-451-1

Liikennevirasto
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelin 0295 34 3000

Valtteri Mäntyjärvi: Kaukoliikenteen henkilöjunien jarrutuskykyvaatimusten tarkastaminen. Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki 2017. Opinnäytetyö 2/2017. 69 sivua ja 2 liitettä. ISSN-2343-1741, ISBN 978-952-317-451-1.

Avainsanat: jarrupainoprosentti, jarrut, jarrutuskykyvaatimukset, jarrutusmatka, juna, kulunvalvonta, liikenne, Liikennevirasto, rautatie

Tiivistelmä

Työn tavoitteena oli tutkia Suomen rataverkolla liikennöivien kaukoliikenteen henkilöjunien jarrutuskykyvaatimusten päivittämistä. Työssä esitellään tämänhetkiset vaatimukset ja lasketaan uudet arvot vaaditulle jarrutuskyvyille. Tämänhetkisten vaatimusten pohjalla olevia laskelmia on aikanaan dokumentoitu hatarasti. Yksi työn pääpainoista oli koota yhteen tärkeimmät jarrutuskykylaskelmiin liittyvät menetelmät, kaavat ja parametrit sekä selvittää jarrutuskykyvaatimusten päivittämisen vaikutuksia. Jarrutuskykyvaatimusten määrittelyn pohjana on jarrutusmatkan laskeminen kaluston ja ympäristön ominaisuudet huomioiden. Junan jarrutuskyvyn täytyy olla niin suuri, että tietty maksimijarrutusmatka ei ylitä. Jarrutuskykyvaatimuksilla on merkitystä erityisesti poikkeustilanteissa, joissa osa kaluston jarruista on toimintakyvyttömiä. Tällöin nykyisin voimassa olevat vaatimukset rajoittavat junan suurimman sallitun nopeuden huomattavasti kaluston rakenteellista huippunopeutta alhaisemmaksi.

Uudet vaatimukset laskettiin käyttämällä viittä eri laskentamenetelmää. JKV- ja ETCS-menetelmät ovat vastaavanimisten kulunvalvontalaitteistojen käyttämiä laskenta-algoritmeja. Lisäksi työn yhteydessä laadittiin uusi laskentamenetelmä fysikaalisten kaavojen ja kirjallisuuden pohjalta. Jarrutustapahtumaan liittyvien ilmiöiden tarkempaa tutkimista varten työssä laadittiin myös simulaatiomalli. Viides laskentamenetelmä, Mindenin kaava, jätettiin lopulta tarkastelun ulkopuolelle, sillä se ei sovellu yli 160 km/h nopeuksille. Näitä neljää menetelmää käyttäen laskettiin vaadittu minimijarrutuskyky lähtönopeuden funktiona siten, ettei jarrutusmatka koskaan ylitä 2400 m tai 3600 m. Nämä matkat perustuvat tiedonsiirtoetäisyyksiin, joilla nykyisin käytössä oleva JKV-kulunvalvontajärjestelmä lähettää junille tietoa. Jarrutustapahtuman ulkoiset parametrit määriteltiin vastaamaan huonointa mahdollista tilannetta jarrujen kannalta. Näihin parametreihin sisältyy muun muassa jyrkin mahdollinen lasku sekä huono kitkakerroin kisko–pyörärajapinnassa. Uudet arvot laskettiin nopeusalueella 110...220 km/h 10 km/h välein, sillä tavarajunat sekä muut korkeintaan 100 km/h nopeudella kulkevat junat rajattiin tutkimusalueen ulkopuolelle.

Työ antaa perustan jarrutuskykyvaatimusten päivittämiselle. Käytössä olevat vaatimukset osoittautuivat laskelmissa paljon tarvittua korkeammiksi. Työssä annetaan neljä erilaista ehdotusta uusiksi vaatimuksiksi sekä pohditaan niiden tuomia hyötyjä ja haittoja. Ennen mahdollista virallistamista tulisi vielä tehdä kattava kustannushyötyanalyysi työssä esitetyille vaihtoehtoilta. Suurin osa työssä annetuista vaihtoehtoista edellyttää myös muita selvityksiä koskien rataverkon varustusta, kuljettajien koulutuksen järjestämistä ja laskennan tulosten validointia teoreettisesti sekä koeajojen avulla.

Valtteri Mäntyjärvi: Granskning av kraven på inbromsningskraft hos persontågen i fjärrtrafik.
Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2017. Lärdomsprov 2/2017. 69 sidor och 2 bilagor.
ISSN-2343-1741, ISBN 978-952-317-451-1.

Sammanfattning

Målet med arbetet var att undersöka en uppdatering av kraven på inbromsningskraft hos persontågen i fjärrtrafik på Finlands bannät. I arbetet presenteras dagens krav och beräknas nya värden för föreskriven inbromsningskraft. De beräkningar som de nuvarande kraven bygger på är vagt dokumenterade. Ett tyngdpunkt i arbetet var att sammanställa de viktigaste metoderna, formlerna och parametrarna i anslutning till beräkning av inbromsningskraft samt att utreda effekterna av en uppdatering av kraven på inbromsningskraft. Definitionen av kraven på inbromsningskraft bygger på en beräkning av bromssträcka beaktande materielens egenskaper och miljöförhållanden. Tågets inbromsningskraft måste vara så stor att en viss maximal bromssträcka inte överskrids. Kraven på inbromsningskraft har betydelse i synnerhet i onormala situationer, där en del av materielens bromsar är ur funktion. Dagens gällande krav begränsar tågets högsta tillåtna hastighet till en nivå betydligt under materielens strukturella topphastighet.

De nya kraven beräknades genom att använda fem olika beräkningsmetoder. Metoderna ATP (Automatic Train Protection) och ETCS (European Train Control System) är beräkningsalgoritmer som tågövervakningssystemen med motsvarande namn använder. Dessutom utarbetades i samband med arbetet en ny beräkningsmetod utifrån fysikaliska formler och litteratur. För att närmare kunna studera fenomen i anslutning till inbromsningen utformades även en simuleringsmodell i arbetet. Den femte beräkningsmetoden, Mindens formel, lämnades slutligen utanför granskningen, eftersom den inte lämpar sig för hastigheter över 160 km/h. I dessa fyra metoder beräknades den föreskrivna minsta inbromsningskraften i form av en funktion av utgångshastigheten så att bromssträcka aldrig överskrider 2 400 m eller 3 600 m. Dessa sträckor baserar sig på de dataöverföringsavstånd på vilka dagens ATP-tågövervakningssystem skickar information till tågen. De yttre parametrarna för inbromsningstillfället definierades att motsvara värsta möjliga läge för bromsarna. I dessa parametrar ingår bland annat brantaste möjliga medlut samt en dålig friktionskoefficient skena-hjulgränsyta. De nya värdena beräknades för hastighetsområdet 110...220 km/h med intervall på 10 km/h, eftersom godståg samt övriga tåg med en hastighet på högst 100 km/h lämnades utanför studieområdet.

Arbetet ger en grund för uppdateringen av kraven på inbromsningskraft. De gällande kraven visade sig i beräkningarna vara mycket högre än vad som behövs. I arbetet ger man fyra olika förslag till nya krav samtidigt som man dryftar för- och nackdelarna med dem. Innan de eventuellt formaliseras borde ytterligare en heltäckande lönsamhetsanalys göras av de alternativ som presenteras i arbetet. Merparten av de alternativ som gavs i arbetet förutsätter även andra utredningar om bannätets utrustning, ordnande av förarutbildning och en utvärdering av beräkningsresultaten teoretiskt samt med hjälp av provkörningar

Valtteri Mäntyjärvi: Inspecting the requirements for the braking ability of long distance passenger trains. Finnish Transport Agency, Engineering and Environment Department. Helsinki 2017. Thesis 1/2017. 69 pages and 2 appendices. ISSN-2343-1741, ISBN 978-952-317-451-1.

Summary

The objective of this thesis was to inspect the requirements for the braking ability of long distance passenger trains in Finland. The requirements currently in use are presented and new, updated values for the required braking ability are calculated. Very little documentation exists on the origins of the current requirements. One of the main focuses of the study is to collate the most important methods, formulae and parameters associated with train braking, as well as to clarify the effects of the alterations to the requirements. The basis for defining the requirements for braking ability is calculating the braking distances of trains. The required braking ability must be high enough to ensure that certain maximum braking distances are rarely, if ever, exceeded. These requirements become especially important in exceptional situations where some of the brakes on a train are out of order. According to the current requirements, in these situations the speed of the train must often be limited to a smaller value than the physical maximum speed of the train, leading to serious delays.

The new requirements were calculated using five methods, which include the braking distance algorithms used by the Finnish and European train control systems, JKV and ETCS, respectively. In addition, a new formula for braking distance calculation was created by the author based on physical formulae and other available literature. To further examine the phenomena behind the braking event, a simulation model was created using the Matlab/SIMULINK software. The fifth calculation method used, the Minden formula, was excluded from the final calculations, as it became apparent that it is not suited for speeds over 160 km/h. Using these four methods, the required minimum braking ability was calculated as a function of the initial speed of the train so that the stopping distance would extremely rarely, if ever, exceed 2400 m or 3600 m. These numbers are based on the distances over which the currently used train control system transmits information to the trains. The external conditions of the braking event were adjusted to represent the worst-case scenario, which includes a steep downhill gradient and a poor coefficient of friction in the wheel–rail interface. The new values were calculated for speeds 110...220 km/h in steps of 10 km/h, since freight trains and other train types traveling at 100 km/h or slower were excluded from the work.

According to the results obtained in this study, the requirements should be updated, as the current requirements proved to be unnecessarily strict. Four alternative models for updating the requirements are presented, and their benefits and disadvantages are discussed. Before any of the models can be taken into use, a comprehensive cost-benefit analysis of each model must be conducted. Furthermore, many of the suggested models also require additional research concerning track infrastructure, driver training and validating of the calculations both theoretically and experimentally.

Esipuhe

Tämän diplomityön on tehnyt Valtteri Mäntyjärvi Liikenneviraston tilauksesta Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun konetekniikan laitoksella kevään ja kesän 2017 aikana.

Ohjaajina toimivat Liikennevirastossa Simo Toikkanen ja Aalto-yliopistossa Panu Sainio.

Helsingissä lokakuussa 2017

Liikennevirasto
Tekniikka ja ympäristö -osasto

Sisällysluettelo

TERMIT, LYHENTEET JA SYMBOLIT	9
1 JOHDANTO	12
1.1 Työn tausta	12
1.2 Aiheen rajausta	14
1.3 Työn tavoitteet	14
1.4 Työn rakenne	14
2 JUNATEKNIIKAN PERUSTEITA	15
3 JUNIEN JARRUJÄRJESTELMÄT	17
3.1 Jarrujen ohjausjärjestelmät	17
3.1.1 Paineilmajärjestelmä	17
3.1.2 EP-jarrujärjestelmä	21
3.2 Jarrumekanismit ja vuorovaikutus radan kanssa	22
3.2.1 Pyörien kautta vaikuttavat jarrumekanismit	22
3.2.2 Kiskoon vaikuttavat jarrumekanismit	23
3.2.3 Kiskon ja pyörän välinen kitka	25
4 JARRUTUSKYKYVAATIMUKSET	27
4.1 Aikaisempi menetelmä jarrutuskyvyn määrittämiseksi	27
4.2 Jarrupainojärjestelmä	27
4.3 JKV ja jarrupainojärjestelmän implementointi	29
5 TYÖSSÄ KÄYTETYT MENETELMÄT	33
5.1 Jarrutusmatkan laskentamenetelmät	33
5.1.1 Mindenin kaava	33
5.1.2 JKV-menetelmä	34
5.1.3 ETCS-menetelmä	36
5.1.4 Fysiikan kaavoihin perustuva menetelmä	38
5.1.5 Simulaatiomalli	43
5.2 Laskentamenetelmien vertailu	48
6 PÄIVITETTYJEN VAATIMUSTEN MÄÄRITTELY	51
6.1 Käsiteltävät junakokoonpanot	51
6.2 Laskennan lähtökohdat	52
6.3 Vaaditun jarrupainoprosentin laskenta	54
6.3.1 JKV-menetelmän mukaan	54
6.3.2 ETCS-menetelmän mukaan	55
6.3.3 Fysiikan kaavoihin perustuvan menetelmän mukaan	55
6.3.4 Simulaatiomallin mukaan	56
7 EHDOTUKSET TULEVAISUUDEN TOIMENPITEIKSI	58
7.1 Vaihtoehto 1	58
7.2 Vaihtoehto 2	59
7.3 Vaihtoehto 3	60
7.4 Vaihtoehto 4	61
7.5 Vaihtoehtojen vertailua	62

8	YHTEENVETO	65
---	------------------	----

	VIITTEET	67
--	----------------	----

LIITTEET

Liite 1	Jarrutusmatkan laskenta fysikaalisilla kaavoilla
Liite 2	Simulaatiomallin tarkempi kuvaus

Termit, lyhenteet ja symbolit

Termit

baliisi	radalle kiskojen väliin asennettu lähetin, joka välittää JKV-informaatiota sen yli kulkeville junille
esiopastin	pääopastinta edeltävä opastin, joka kertoo junan kuljettajalle, mitä opastetta seuraava pääopastin näyttää
jarrupaino	kullekin junakalustoyksikölle määritelty suure (yksikkö tonni), joka kuvaa yksikön jarrutuskykyä
jarrupainoprosentti	junakalustoyksikön jarrupainon ja kokonaismassan suhdetta kuvaava suure
jarruvoiman nousuaika	aika, joka kuluu junan jarruvoiman noustessa nolasta maksimiarvoonsa
junakalustoyksikkö	yksittäinen veturi, vaunu, moottorivaunu, vaunuyhdistelmä tai moottorijunarunko, jota ei voi jakaa pienempiin osiin
junan dynaaminen massa	junan massa, jossa on huomioitu pyörivien osien (pyörät, akselit, moottorien osat) aiheuttama hitaus
junan staattinen massa	junan todellinen massa
Junavastusvoima	kaikkien junaan vaikuttavien voimien, paitsi jarruvoiman ja kaltevuudesta johtuvan painovoiman, summa
moottorivaunu	junakalustoyksikkö, joka tuottaa vetovoimaa ja kykenee lisäksi kantamaan hyötykuormaa
opastin	radan varressa sijaitseva laite, jolla annetaan värillisin valo-opastein junan kuljettajalle käskyjä
pituuskaltevuus	radan kaltevuus vaakatasoon nähden junan kulkusuunnassa
pyöräkerta	kahden pyörän ja niitä yhdistävän akselin muodostama kokonaisuus
pääopastin	opastin, joka antaa junan kuljettajalle käskyn joko pysähtyä, ajaa tai ajaa rajoitetulla nopeudella
suurin nopeus	suurin sallittu kulkunopeus tietyllä junavuorolle
teli	kehys, jossa on ripustus yhdelle tai useammalle pyöräkerralle ja joka pääsee kääntymään junayksikön alla vaakatasossa
tyyppikoe	käyttöönotettavalle uudentyyppiselle junayksikölle suoritettava koesarja, jossa muun muassa määritetään JKV- ja ETCS-laskennassa yksikölle käytettävät parametrit
Vaunu	junakalustoyksikkö, joka ei tuota vetovoimaa

veturi	junakalustoyksikkö, joka tuottaa vetovoimaa, mutta ei ole suunniteltu kantamaan hyötykuormaa
--------	--

Lyhenteet

BCU	brake control unit, jarrujen ohjausyksikkö
Dm12	dieselmoottorivaunu, tyyppi 12
Dr14	raskas dieselveturi, tyyppi 14
Dr16	raskas dieselveturi, tyyppi 16
Dr18	raskas dieselveturi, tyyppi 18
Dv12	väliraskas dieselveturi, tyyppi 12
EP	electro-pneumatic, sähköpneumaattinen
ETCS	European Train Control System, eurooppalainen junien kulunvalvontajärjestelmä
IC	InterCity
JKV	junien kulunvalvontajärjestelmä
Sm3	sähkömoottorijuna, tyyppi 3 (Pendolino)
Sm5	sähkömoottorijuna, tyyppi 5 (FLIRT)
Sm6	sähkömoottorijuna, tyyppi 6 (Allegro)
SNCF	Société Nationale des Chemins de Fer Français, Ranskan valtionrautatiet
Sr1	raskas sähköveturi, tyyppi 1
Sr2	raskas sähköveturi, tyyppi 2
Sr3	raskas sähköveturi, tyyppi 3
Sn	suurin nopeus
UIC	Union Internationale des Chemins de fer, Kansainvälinen rautatieliitto

Symbolit

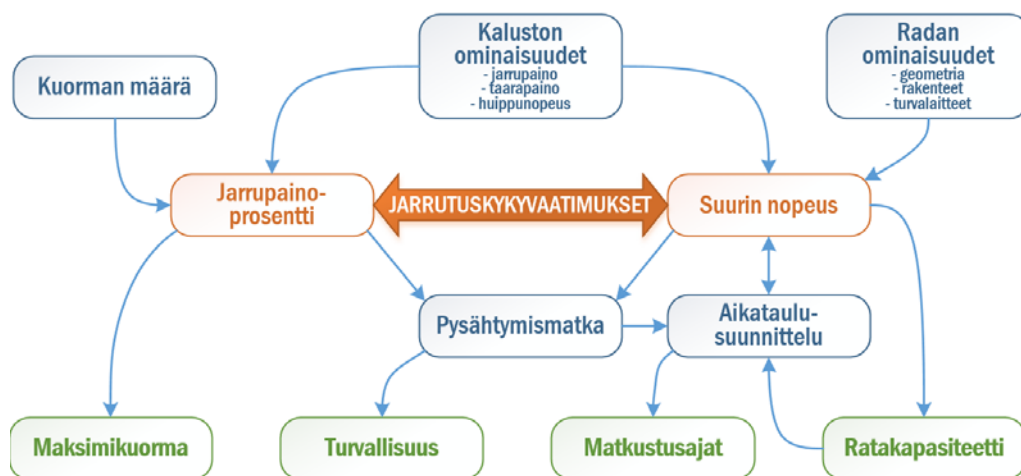
A_{\perp}	junan liikesuuntaa vastaan kohtisuora pinta-ala
B	jarrupaino
B	hidastuvuus
F	voima
g	vakioputoamiskiihtyvyys 9,81 m/s ²
I	radan pituuskaltevuus
L	junan pituus
M _{dyn}	junan dynaaminen massa
m _{st}	junan staattinen massa
n _{ax}	junan akseliluku
s	pysähtymismatka
t _b	jarruvoiman kehittymisaika
v	junan hetkellinen nopeus
v ₀	junan nopeus jarrutuksen aloitushetkellä
α	kiskon ja pyörän välinen kitkakerroin
Θ	radan pinnan ja vaakatason välinen kulma
λ	jarrupainoprosentti
ρ_T	junan dynaamisen ja staattisen massan suhde

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Jarruilla on junissa kolme päätehtävää. Ensinnäkin, niiden avulla tulee voida hiljentää junan vauhtia ja tarvittaessa pysäyttää juna kokonaan. Toinen jarrujen päätehtävä on junan nopeuden stabiloiminen. Esimerkiksi radan kaltevuuden muuttuessa on erittäin tärkeää, että jarrujen avulla voidaan säilyttää junan nopeus vakiona. Kolmas jarrujen päätehtävä on pysähtyneenä olevan kaluston paikallaan pitäminen siten, että se ei lähde itsestään liikkeelle esimerkiksi tuulen tai radan kaltevuuden vaikutuksesta. [1] Junissa tyypillisimmin käytettyjä jarrujärjestelmiä ovat paineilmaohjatut kitkajarrut, voimansiirtoon vaikuttavat jarrut sekä suoraan kiskoon vaikuttavat jarrut [2]. Näiden lisäksi pysähtyneen kaluston paikallaan pitämiseen käytetään usein kaluston omaa käsijarrua sekä pysäytyskenkiä [3]. Paineilmajarruissa ohjataan jarrupalojen liikettä jarrulevyjä tai pyörien kulkupintoja vasten. Jarrupalan painautuminen liikkuvaa pintaa vasten aiheuttaa kitkavoiman, jonka tekemän työn seurauksena junan liike-energiaa muuntuu lämmöksi. Paineilma tuotetaan veturin tai junayksikön kompressorilla, ja siihen varastoidun energian avulla sekä puristetaan jarrut kiinni että ohjataan niiden käyttäytymistä. [2]

EU-lainsäädännön [4] mukaan rataverkon haltija on vastuussa jarrutuskäyvyn määrittämisestä rataverkollaan. Suomen valtion rataverkon haltija on Liikennevirasto. Liikennevirasto määrittelee junille jarrutuskäyvaatimukset, joilla on rataverkolla liikennöinnin kannalta monia vaikutuksia. Näitä vaikutuksia on havainnollistettu kuvassa 1. Kuten kuvasta nähdään, jarrutuskäyvaatimukset vaikuttavat muun muassa junien suurimpiin sallittuihin nopeuksiin, junille sallittaviin kuormamääriin, pysähtymismatkoihin, matkustusaikoihin, turvallisuuteen, ratakapasiteettiin ja aikataulusuunnitteluun. [3] Jarrutuskäyvaatimusten oikeellisuus mahdollistaa siis paitsi liikennöinnin turvallisuuden, myös ratakapasiteetin ja junien rakenteellisten huippunopeuksien optimaalisen hyödyntämisen sekä pidemmät ja raskaammat junat. [5]



Kuva 1. Jarrutuskäyvaatimusten vaikutukset rautateillä liikennöintiin [3].

Jarrutuskykyvaatimusten määrittelyn pohjana on turvallisen jarrutusmatkan laskeminen huomioon ottaen kaluston ja ympäristön ominaisuudet. Kiskon ja pyörän välinen kitkakerroin ei ole kovin suuri, mikä rajoittaa pyörien kautta välitettävän jarrutusvoiman suuruutta. Tämä yhdistettynä junien suuriin massoihin tekee junien jarrutusmatkoista hyvin pitkiä. [2] Pitkien jarrutusmatkojen vuoksi junaa ei ole mahdollista pysäyttää suurista nopeuksista kuljettajan silmämääräisten havaintojen perusteella. Siksi Suomen rautateillä on käytössä junien kulunvalvontajärjestelmä (JKV), joka ilmoittaa kuljettajalle hyvissä ajoin jarrutustarpeesta. [6] Järjestelmälle on asetettu tiedonsiirtoetäisyys, jonka suuruus perustuu radan suurimpaan sallittuun nopeuteen. Tiedonsiirtoetäisyys on etäisyys, jolla kuljettaja voi aikaisintaan saada tiedon edessä olevasta nopeusrajoituksesta tai pysähtymiskäskystä, ja se voi vaihdella 1200 metristä jopa yli 5000 metriin. Radoilla, joilla suurin sallittu nopeus on enemmän kuin 160 km/h, on tiedonsiirtoetäisyyden oltava vähintään 3600 m. [7] Tämä tarkoittaa käytännössä, että jokaisen valtion rataverkolla liikennöivän junan on ehdottomasti kyettävä pysähtymään täydestä nopeudesta tiedonsiirtoetäisyyden mittaisella matkalla. Liikenneviraston määrittelemissä jarrutuskykyvaatimuksissa luodaan edellytykset sille, että tämä ehto täyttyy.

Kuten kuvassa 1 on havainnollistettu, jarrutuskykyvaatimukset on tällä hetkellä määriteltä kahden tärkeän suureen, jarrupainoprosentin sekä suurimman nopeuden, välisenä riippuvuussuhteena [8]. Käytännössä tämä riippuvuus on kuvattu taulukkona, joka on esitetty työssä jäljempänä, luvussa 4.2. Jarrupainoprosentti on suure, joka kuvaa junan tuottaman jarrutusvoiman suuruutta suhteessa sen massa. Suurin nopeus puolestaan on kullekin junavuorolle erikseen määriteltävä suurin sallittu nopeus, jonka suuruus riippuu muun muassa radan ja kaluston ominaisuuksista sekä aikataulutuksen vaatimuksista. [9] Kontrolloimalla jarrupainoprosentin ja suurimman nopeuden välistä riippuvuutta voidaan säädellä junan jarrutusmatkaa.

Edellisen kerran vaatimukset junien jarrutuskyvyille Suomen rataverkolla on uudistettu vuonna 1993, jolloin siirryttiin käyttämään jarrupainojärjestelmää junan jarrutuskyvyn määrittämiseen. Toimenpiteellä varauduttiin tällöin JKV:n käyttöönottoon. Automaattisen kulunvalvontajärjestelmän käyttäminen vaatii, että junan jarrutuskyky on hyvin tarkasti tiedossa. Tätä ennen käytössä ollut menetelmä oli varsin karkea, joissain tilanteissa jopa virheellinen ja hyvin pitkälti perustui kuljettajan vaistoihin. [10] Aiemmin käytössä ollut järjestelmä on tarkemmin kuvailtu luvussa 4.1.

Uudet standardit, rataliikenteen määrän muutokset, liikennöitsijöiden toivomukset ja tekninen kehitys asettavat Liikennevirastolle paineita jarrutuskykyvaatimusten tarkistamiselle. Tällä hetkellä vaatimusten tarkistamiselle on tarvetta, sillä 1990-luvun puolenvälin jälkeen käytössä oleva kalusto on suurimmaksi osaksi muuttunut muun muassa kaksikerroksisten InterCity (IC) -vaunujen sekä Sm6-junayksiköiden käyttöönoton myötä. Lisäksi on havaittu, että vaikka normaaliolosuhteissa nykyiset jarrutuskykyvaatimukset eivät yleensä rajoita junien nopeutta, ne aiheuttavat poikkeustilanteissa huomattavaa haittaa liikenteelle. Mikäli junassa on yksiköitä, joiden jarrut eivät ole toiminnassa, on junan jarrutuskyky alhaisempi ja junan nopeutta saatetaan joutua rajoittamaan kaluston rakenteellista huippunopeutta alhaisemmaksi. Nykyisen taulukon mukaan tämä nopeudenalennus on niin suuri, että se aiheuttaa kohtuuttomia myöhästymisiä. Edellä mainittujen syiden lisäksi tuleva liittyminen Euroopan yhtenäiseen ETCS-kulunvalvontajärjestelmään (European Train Control System) asettaa tarpeita vaatimusten päivittämiseksi. [3]

1.2 Aiheen rajaus

Tässä työssä käsitellään kaukoliikenteen henkilöjunien jarrutuskyyvaatimusten tarkistamista. Työ on tehty Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun kone-tekniikan laitoksella Liikenneviraston tilauksesta. Tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuustutkimusta ja asiantuntijoiden haastattelua. Uudet arvot määritellään laskennallisesti sekä VR:n tekemien jarrutuskokeiden tulosten avulla. Tavara-, museo-, huolto- ja lähiliikenteen vaatimukset on jätetty työn ulkopuolelle. Työn rajaus perustuu Liikenneviraston toivomuksiin ja siihen, että kaukoliikenteen henkilöjunissa on käytössä rataverkoston suurimmat nopeudet, jolloin niissä korostuu jarrutuskyyvaatimusten oikeellisuuden merkitys.

1.3 Työn tavoitteet

Työn pääasiallinen tavoite on esitellä nykyisin voimassa olevat junien jarrutuskyyvaatimukset sekä tarkastella, onko vaatimuksia syytä tai mahdollisuutta muuttaa. Tarvittaessa työn toisena päätavoitteena on tuottaa uudet arvot junien vaaditulle jarrutuskyyvylle. Lisäksi työn avulla kootaan yhteen dokumenttiin olennaisimmat jarrutuskyyvylaskelmiin liittyvät menetelmät, kaavat ja parametrit, jotka ovat tällä hetkellä esitettynä monissa eri määräyksissä, ohjeissa ja standardeissa. Edellä mainittujen tavoitteiden lisäksi työ pyrkii antamaan aihepiiriin perehtymättömälle lukijalle kattavan selvityksen rautateillä käytettävien jarrujärjestelmien ominaispiirteistä ja jarrutuskyyvaatimusten vaikutuksesta rautateillä liikennöintiin.

1.4 Työn rakenne

Ensimmäisenä työssä käsitellään junatekniikan perusteita ja luodaan pohja työssä käytettävälle terminologialle. Tähän keskittyy luku 2. Luvussa 3 käsitellään junien jarruissa käytettyjä mekanismeja ja ohjausjärjestelmiä. Luvussa 4 esitellään tällä hetkellä Suomessa voimassa olevat vaatimukset junien jarrutuskyyvylle. Koska näiden vaatimusten perustana on jarrupainojärjestelmänä tunnettu laskentatapa, käsitellään luvussa 4 myös jarrupainojärjestelmän perusteita. Luvussa 5 kootaan yhteen kirjallisuudesta saatavat laskentamenetelmät sekä johdetaan kaksi omaa laskentamenetelmää, joiden avulla junille voidaan määrittää uudet jarrutuskyyvaatimukset. Luku 6 keskittyy uusien jarrutuskyyvaatimusten laskentaan luvussa 5 esiteltyjen metodien avulla. Luvussa 7 pohditaan tämän työn tulosten perusteella ehdotettuja toimintoja, niiden vaatimia toimenpiteitä sekä niiden tuomia hyötyjä.

2 Junatekniikan perusteita

Raideliikenne on kuljetusmuotona varsin tehokas. Sen pääasiallinen ero muihin liikennemuotoihin on teräspyörien käyttö teräskiskojen päällä. Näiden materiaalien jäykkyys tekee junan vierimisvastuksesta lähes olemattoman, mikä mahdollistaa liikkeen paremman säilyvyyden, alhaisemmat häviöt ja täten energiatehokkaamman liikennöinnin kuin esimerkiksi maanteillä. Muun muassa näistä syistä johtuen junia käytetään kaikkein massiivisimpiin maitse tapahtuviin kuljetuksiin.

Liikkuvat yksiköt, eli junat, noudattavat ainoastaan raiteiden sanelemia reittejä eivätkä voi esimerkiksi ohittaa toisiaan ilman toista, rinnakkaista raidetta. Lisäksi suuret massat aiheuttavat sen, että junan pysäyttäminen näköetäisyydeltä ei ole mahdollista edes suhteellisen alhaisilla nopeuksilla. Tästä johtuen junien kulkua ohjataan opastinjärjestelmällä. Opastin on liikennevaloon verrattavissa oleva radan varteen asennettava laite, joka antaa junan kuljettajalle värillisin valoin ilmaistuja ohjeita ja käskyjä. Ratalinjalla liikennepaikkojen välillä olevat opastimet ovat pääsääntöisesti pää- tai esiopastimia. Pääopastin antaa varsinaisen käskyn, kun taas esiopastin tiedottaa kuljettajaa etukäteen siitä, mitä opastetta seuraava pääopastin näyttää. Pääopastimen antamat käskyt ovat Seis (punainen valo, opastinta ei saa ohittaa ilman lupaa), Aja (vihreä valo, opastimen saa ohittaa suurinta sallittua nopeutta) tai Aja 35 (vihreä ja keltainen valo, suurin nopeus rajoitettu 35 km/h:iin). Suurimmalla osalla rautateistä tiedonvälitystä on myös tehostettu automaattisella kulunvalvontajärjestelmällä, jolla kuljettajalle voidaan antaa tieto edessä olevan pääopastimen opasteesta vielä enemmän etukäteen. [6]

Junat koostuvat junakalustoyksiköistä, jotka voidaan jakaa kahteen luokkaan sen mukaan, ovatko ne vetäviä vai eivät. Junakalustoyksiköllä tarkoitetaan sellaista raiteilla kulkevaa ajoneuvoa, jota ei voi normaalikäytössä jakaa pienempiin osiin. Vetävää kalustoyksikköä, jota ei ole suunniteltu kantamaan hyötykuormaa vaan ainoastaan tuottamaan vetovoimaa, kutsutaan veturiksi. Jos vetävä kalustoyksikkö kykenee kuljettamaan hyötykuormaa, sitä kutsutaan moottorivaunuksi. Vetämätöntä kalustoyksikköä kutsutaan vaunuksi. Jos vaunu on tarkoitettu kytkettäväksi nimenomaisesti tietynlaiseen moottorivaunuun, sitä kutsutaan liitevaunuksi tai välivaunuksi. Moottori- ja liite- tai välivaunut muodostavat yhdessä moottorijunan. Mikäli kuitenkin moottorijuna on sellainen, ettei sen kokoonpanoa voi muuttaa normaalikäytössä, käsitetään se yhdeksi junakalustoyksiköksi. [11] Tällaisia moottorijunayksiköitä voidaan kuitenkin yleensä kytkeä yhteen pidempien junien muodostamiseksi.

Junat voivat siis olla tyypiltään joko veturivetoisia tai moottorijunia. Moottorijunayksiköitä, joilla on kiinteä kokoonpano, ei voi jakaa pienempiin osiin. Siksi tämän tyyppisissä junissa ajomoottorit, paineilman tuotto, mahdollinen sähkön generointi ynnä muut tekniset toiminnot voidaan jakaa useampaan vaunuun yksikön sisällä. Veturijunissa sen sijaan kaikkien edellä mainittujen toimintojen on pääsääntöisesti sijaittava veturissa, sillä veturiin voidaan teoriassa kytkeä minkälainen vaunukokoonpano tahansa. Toisinaan junissa tosin käytetään erityisiä aggregaattivaunuja, joiden avulla paineilmaa ja sähköä voidaan tuottaa myös muissa osissa junaa. Moottorijunia käytetään tyypillisesti vain henkilöliikenteessä, sillä tavarajunien kokoonpano vaihtelee varsin huomattavasti. Suomessa kaukoliikenteen vuoroista kuitenkin noin 75 % on veturivetoisia junia. Veturivetoisissa matkustajajunissakin tosin käytetään tyypillisesti niin sanottuja junarunkoja, joissa samat vaunut voivat olla kytkettynä toisiinsa pitkiäkin aikoja.

Suurin osa nykypäivän junista käyttää voimanlähteenään sähköä. Sähkö tuodaan juniin positiivisena johtimena toimivan ilmajohdon tai virtakiskon kautta. Virta kulkee johtimesta junan virroittimen ja säätöpiirien kautta sähkömoottoreille. Sähkömoottorin toinen napa on yhdistetty junan pyörien kautta kiskoihin, jotka toimivat nolla-johtimena. Sähköjunan voimanlähteenä voidaan käyttää joko tasa- tai vaihtojännitettä. Suomen valtion rataverkolla käytettävä jännite on ilmajohdon kautta syötettävä 25 kV 50 Hz vaihtojännite. Suomessa sähkövetureita on kolmea eri tyyppiä (Sr1–Sr3) ja sähkömoottorivaunuja sekä -junia kuutta eri tyyppiä (Sm1–Sm6). Kaikkia sähkövetureita sekä sähkömoottorijunatyyppejä Sm3 (Pendolino) ja Sm6 (Allegro) käytetään nopeassa kaukojunaliikenteessä.

Sähköistämättömillä rataosilla käytettävässä kalustossa on tyypillisesti voimanlähteenä dieselpolttoaine. Suomessa valtion radoilla on käytössä neljän eri tyypin dieselvetureita (Dv12, Dr14, Dr16, Dr18) sekä Dm12-tyypin dieselmoottorivaunuja. Dieselkalustossa moottorin tuottama teho siirretään pyöriin joko hydraulisen (Dv12, Dr14, Dm12) tai sähköisen (Dr16, Dr18) voimansiirron välityksellä. Dieselvetureista henkilöliikenteessä käytetään Dv12- ja Dr16-tyyppejä.

Pyöräkerralla tarkoitetaan kahden pyörän ja niitä yhdistävän akselin muodostamaa kokonaisuutta, ja pyöräkertojen määrää yksikössä kutsutaan akseliluvuksi. Vaunujen, moottorivaunujen sekä vetureiden akseliluku ja akselien ryhmittely voi vaihdella huomattavasti. Kalustoyksikössä akseleita voi olla kahdesta jopa 32:een¹ kappaletta. Tyypillisin akseliluku lähes kaikille junakalustotyypeille on neljä. Ainoa poikkeus tähän Suomen henkilöliikenteessä on Sm5-moottorijuna, jossa neljän osion muodostamassa nivelöidyssä yksikössä on yhteensä kymmenen pyöräkertaa. Yleensä pyöräkerrat on kiinnitetty yksikön runkoon telin välityksellä. Telillä tarkoitetaan vaunun, veturin tai moottorivaunun alla sijaitsevaa kehystä, johon yksikön pyöräkerrat on kiinnitetty. Telit pääsevät kääntymään yksikön rungon suhteen, mikä mahdollistaa pitkien yksiköiden kääntymisen kaarteissa. Lisäksi telirakenne mahdollistaa kaksinkertaisen jousituksen, eli pyöräkerrat voidaan jousittaa kiinni teliin ja telit jousittaa kiinni runkoon.

¹ Muuntajien kuljetusta varten suunnitellussa VR:n Osg-suurkuormavaunussa on 32 pyöräkertaa. Näin suuret akseliluvut ovat kuitenkin erikoistapauksia.

3 Junien jarrujärjestelmät

Tässä luvussa kuvaillaan rautateillä yleisimmin käytetyt jarruteknologiat. Luvussa 3.1 esitellään junissa käytettyjen jarrujen ohjaamiseen käytettyjä teknologioita, niiden toimintaa ja historiallista kehitystä. Luvussa 3.2 puolestaan keskitytään itse jarrutyyppeihin. Lisäksi luvussa käsitellään junan vuorovaikutusta radan kanssa ja mitä ehtoja se asettaa jarrujen toiminnalle.

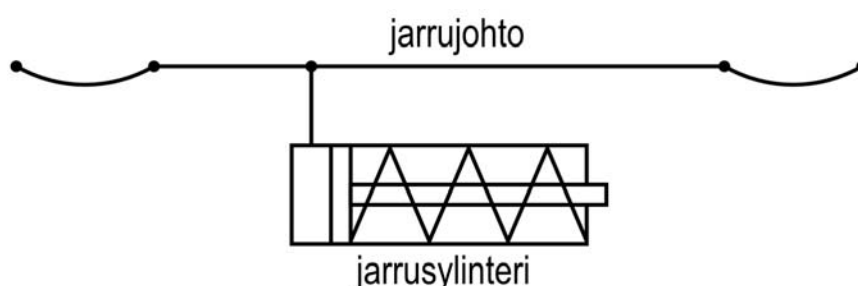
3.1 Jarrujen ohjausjärjestelmät

Tässä luvussa esitellään jarrumekanismien ohjaamiseen käytettyjä järjestelmiä. Alaluvussa 3.1.1 esitellään paineilmajarrujärjestelmän kehitystä ja tekniikkaa. Alaluvussa 3.1.2 käsitellään EP-jarrujärjestelmää, joka on paineilmajärjestelmän kehittyneempi sähköohjattu variantti.

3.1.1 Paineilmajärjestelmä

Ensimmäiset junien jarrut olivat mekaanisia kitkajarruja, joissa jarrupala painettiin pyörän pintaa vasten lihasvoimalla vivun, ruuvin tai muun mekanismin välityksellä. Junien pituuden ja nopeuden kasvaessa kävi kuitenkin ilmeiseksi, että junan jokaisen vaunun, ei pelkästään veturin tai mahdollisen jarruvaunun, on kyettävä jarruttamaan. [1] Tämä johtuu siitä, että jos pelkästään veturi jarruttaa, vaunut alkavat työntää veturia takaapäin. Se puolestaan aiheuttaa junaan kohtuuttomia pitkittäissuuntaisia voimia, jotka saattavat jopa suistaa junan kiskoilta. [12] Vuonna 1869 yhdysvaltalainen keksijä George Westinghouse patentoi junien jarrutusta ohjaavan paineilmajärjestelmän [13]. Tämän keksinnön olennainen perusperiaate, eli koko junan jarrujen ohjaaminen veturista käsin paineilman avulla, on kansainvälinen standardi vielä tänäkin päivänä [1].

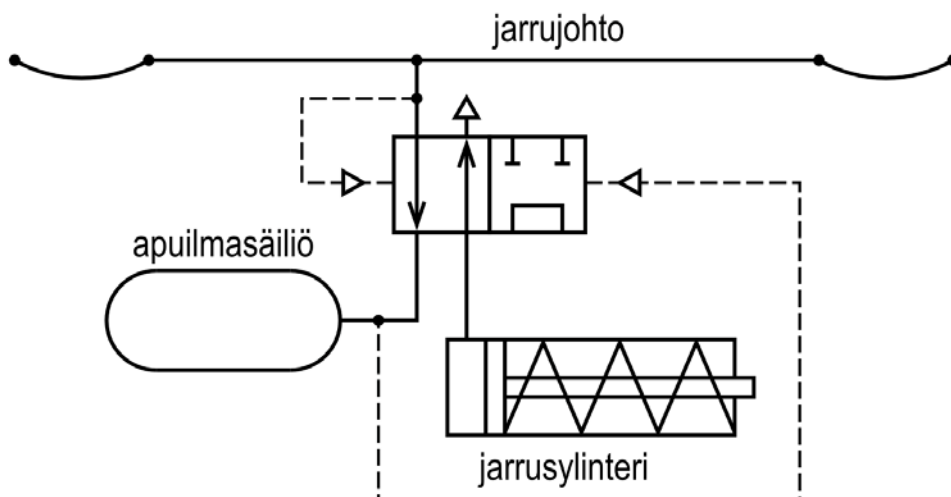
Westinghousen kehittämä paineilmajärjestelmä on niin kutsuttu suoratoiminen paineilmajarru (kuva 2). Suoratoimisen paineilmajarrun toimintaperiaate on yksinkertainen. Koko junan läpi kulkee jarrujohto, joka on vetokalustoyksikön paineilmasäiliöön liitetty paineilmajohdo. Jokaisessa vaunussa jarrujohto on yhteydessä vaunun jarrupaloja ohjaavaan jarrusylinteriin. Jarrutettaessa avataan ohjausventtiili paineilmasäiliön ja jarrujohdon välistä, ja ilmanpaine nousee johdossa sekä jokaisen vaunun jarrusylintereissä. Jarrusylinterit painavat tällöin jarrupalat kiinni pyöriin. Jarrujen irrotus puolestaan tapahtuu kääntämällä ohjausventtiili yhdistämään jarrujohto ulkoilmaan. Tällöin jarrujohto tyhjenee, paine alenee ja jarrusylinterien palautinjouset vetävät jarrupalat irti pyöristä. [1, 13]



Kuva 2. Suorapainejarrun pneumaattinen kaavio. Muokattu lähteestä [1].

Suoratoimisen paineilmajärjestelmän merkittävimpiä haittana on kuitenkin turvattuus poikkeustilanteissa, ja siksi sitä ei juurikaan nykypäivänä käytetä koko junan jarrujärjestelmänä. Suoratoimiset jarrut ovat kuitenkin edelleen usein käytössä vetureiden omana, muista vaunuista erillisenä paineilmajarruna. Suoratoimisen koko junan käsittävän jarrujärjestelmän haittana on esimerkiksi se, että junan katketessa ei kumpaakaan junan osaa voida jarruttaa, sillä avonaiseen paineilmajohtoon ei voi muodostaa painetta. Myös veturin paineilmalaitteiston toimintahäiriö tai vuoto missä tahansa kohtaa järjestelmää tekevät jarruista käyttökelvottomia. [1]

Suoratoimisen paineilmajärjestelmän haittapuolia korjaamaan kehitettiin itsetoiminen paineilmajärjestelmä (kuva 3). Sen toiminta perustuu niin ikään koko junan läpi ulottuvaan jarrujohtoon. Erona suoratoimiseen systeemiin turvallisuuden kannalta on kuitenkin se, että jarrujohdon katketessa itsetoimisessa järjestelmässä jarrut kiinnittyvät automaattisesti. Itsetoimisessa järjestelmässä veturi ylläpitää jarrujohdossa vakio-painetta jarrujen ollessa irrotettuina. Kansainvälisen rautatieliitto UIC:n standardien mukaan tämä paine on suuruudeltaan 5 bar [6]. Tätä standardia noudatetaan myös Suomessa. Jarrujohdossa vallitsevalla paineella on kaksi merkitystä. Ensinnäkin veturin generoimalla paineilmalla täytetään jarrujen apuilmasäiliöt. Toiseksi, paineen suuruutta säätelemällä vaikutetaan jarruja ohjaavien toimintaventtiilien asentoon.

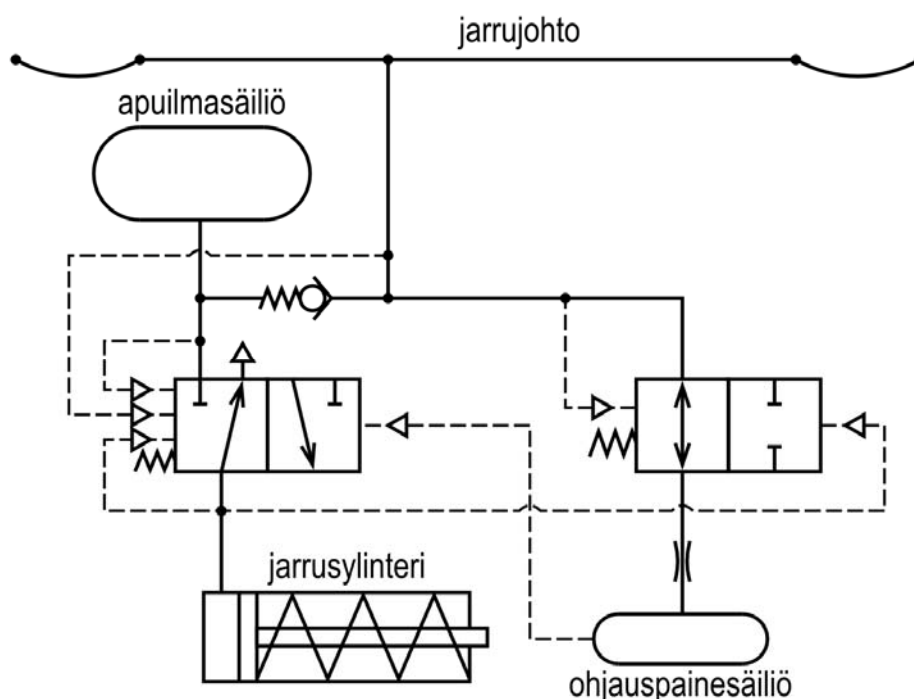


Kuva 3. Itsetoimisen paineilmajarrun pneumaattinen kaavio. Piirretty lähteen [1] perusteella.

Toimintaventtiili on paineilmakomponentti, joka muodostaa itsetoimisen järjestelmän toiminnallisuuden perustan. Junan jarrujen ollessa irrotettuina toimintaventtiili muodostaa yhteyden a) jarrujohdon ja apuilmasäiliön välille sekä b) jarrusylinterin ja ulkoilman välille. Tällöin jarrusylinterin palautusjousoi pitää jarrupalan irti pyörästä tai jarrulevystä, ja jarrujen apuilmasäiliöön generoituu sama paine kuin jarrujohtoon. Kun junaa jarrutetaan, jarrujohto yhdistetään ulkoilmaan veturissa. Tällöin jarrujohdon paine laskee ja toimintaventtiili vaihtaa asentoa siten, että apuilmasäiliö yhdistyy jarrujohdon sijasta jarrusylinteriin, ja jarrusylinterin yhteys ulkoilmaan katkeaa. Jarrusylinteriin muodostuu ylipaine, joka painaa jarrupalan kiinni pyörään tai jarrulevyyn. Epäsuora paineilmajärjestelmä on huomattavasti suoratoimista järjestelmää toimintavarmempi, sillä mikäli paine jarrujohdossa alenee tahattomasti, niin jarrut kiinnittyvät automaattisesti. Tämä tekee järjestelmästä erittäin turvallisen, ja siksi se onkin vakiintunut standardiksi ympäri maailmaa.

Pitkissä junissa paineilmajärjestelmän ongelmaksi nousee paineaallon propagaation hitaus pitkässä jarrujohdossa. Kun jarrujohtoa aletaan tyhjentää, painesignaali etenee johdossa noin 270...300 m/s nopeudella. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi 700 m pitkässä tavarajunassa junan viimeisen vaunun jarrut alkavat kiinnittyä vasta noin 2,5 s ensimmäisen vaunun jälkeen. [2] Tästä seuraa se, että etummaisat vaunut jarruttavat enemmän kuin perimmäiset, mikä puolestaan johtaa pitkittäissuuntaisiin puristusvoimiin. Vastaavasti junan jarruja irrotettaessa ensimmäisten vaunujen jarrut irtoavat ensin ja perimmäisten viimeiseksi. Tämä puolestaan aiheuttaa pitkittäissuuntaisia veto-voimia, jotka asettavat vaunujen väliset kytkimet suurelle rasitukselle. Pahimmassa tapauksessa kytkin voi pettää ja juna katketa.

Edellä kuvaillun kaltaisella toimintaventtiilillä on mahdollista kiinnittää jarrut vähitellen, eli laskea jarrujohdon painetta hitaasti siten, että jarrutusvoiman erot eri junan osissa vähenevät. Tyypillinen paineenalennusnopeus junien jarruissa on noin 100...200 mbar/s [12]. Ongelmana on kuitenkin jarrujen irrottaminen. Kun jarrujohdon painetta aletaan nostaa, jarrut irtoavat välittömästi kokonaan, sillä toimintaventtiili muodostaa suoran yhteyden jarrusylinteristä ulkoilmaan. Tähän ongelmaan on kehitetty ratkaisuksi niin kutsuttu kolmipaineventtiili. Kolmipaineventtiilin toiminta on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Kolmipaineventtiilin pneumaattinen kaavio. Piirretty lähteen [1] perusteella.

Kolmipaineventtiilissä käytetään nimensä mukaisesti hyväksi kolmea eri painetasoa venttiilin asennon määrittämiseen. Sylinderipaineen ja jarrujohtopaineen lisäksi venttiilin toimintaa ohjaa ohjauspainesäiliöön varastoitu paine. Jarrujen ollessa auki apuilmasäiliöön sekä ohjauspainesäiliöön generoituu jarrujohdon paine. Kun jarrutus-käsky annetaan, jarrujohdon paine laskee, mutta ohjauspainesäiliön paine ei pääse laskemaan yhtä nopeasti ahtaan kuristuksen takia. Venttiilin karaa ohjaava voima-tasapaino muuttuu siten, että jarrusylinterin yhteys ulkoilmaan sulkeutuu ja yhteys apuilmasäiliöön avautuu. Kun sylinteripaine pääsee muodostumaan, se estää ohjaus-

painesäiliön paineen alenemisen. Ero on kuitenkin jarrujen irrotuksessa. Kun irrotuskäsky annetaan, paine jarrujohdossa nousee. Tällöin jarrusylinterin yhteys ulkoilmaan avautuu ja sylinterin paine alenee vähentäen jarruvoimaa. Mikäli kuitenkin jarrujohdon painetta nostetaan vain vähän kerrallaan, venttiili avautuu vain niin kauaksi aikaa, että jarrujohdon paineen muutosta vastaava paineenalennus tapahtuu jarrusylinterissä, minkä jälkeen jarrusylinterin yhteys ulkoilmaan sulkeutuu. Näin ollen jarrut voidaan myös irrottaa vähitellen, toisin kuin kaksipaineventtiilin kanssa.

Kuten aiemmin todettiin, paineilman rajoittunut propagaationopeus jarrujohdossa aiheuttaa varsinkin pitkissä junissa sen, että junan viimeisten vaunujen jarrut kiinnittyvät huomattavasti myöhemmin ja hitaammin kuin ensimmäisten vaunujen jarrut. Ilmiötä voidaan lieventää rajoittamalla jarrusylinterien täyttymisnopeutta. Tästä syystä jokaisessa yksikössä on tavallisesti mahdollista valita, kuinka nopeasti kyseisen yksikön jarrujen halutaan reagoivan jarrujohdon paineenalennukseen. Tätä asetusta kutsutaan vaunun jarrulajiksi. [6] Käytännössä jarrulajeja on kolme, ja ne on esitelty taulukossa 1 Suomessa pätevine käyttöalueineen.

Taulukko 1. Junien paineilmajarrujen jarrulajit ja niiden käyttöalueet Suomessa [1, 9].

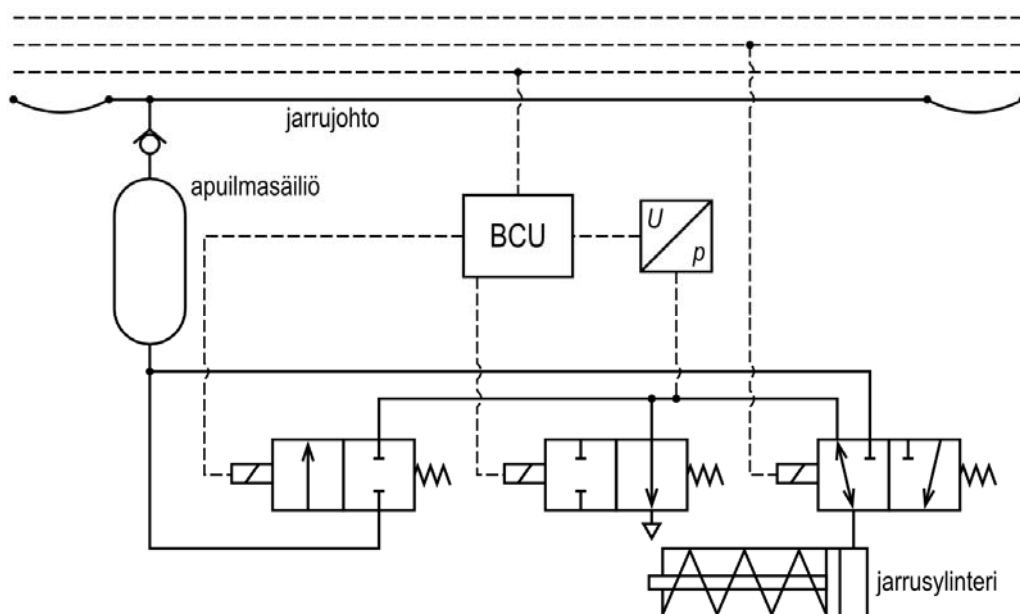
Jarrulaji	Kuvaus	Käyttöalue
G	Hidas	Tavarajunat, joiden suurin nopeus (sn) on 90 km/h tai alle
P	Nopea	Matkustajajunat, joiden sn on 120 km/h tai alle sekä tavarajunat, joiden sn on yli 90 km/h
R	Nopea ja voimakas	Matkustajajunat, joiden sn on yli 120 km/h

Erot jarrulajien välillä ilmenevät jarrusylinterien täyttymis- ja tyhjenemisajoissa. G-jarrulajilla jarrusylinterin täytyminen kestää 18...30 s ja tyhjeneminen 45...60 s, kun taas P- ja R-lajeilla täytyminen kestää vain 3...6 s ja tyhjeneminen 15...25 s. P- ja R-jarrulajit erottaa toisistaan tässä suhteessa ainoastaan paineenalennuksen suuruus. [1] Suomessa jarrulajeja G ja P on toisinaan kutsuttu myös vastaavilla symboleilla T ja M tarkoittaen tavara- ja matkustajajunia. Matkustajavaunuissa, joissa R-jarrulajia ei ole saatavilla, voidaan Suomessa nopeusalueella 120...140 km/h käyttää myös P-jarrulajia. [9]

Jarrujen irrotusaika on huomattavasti korkeampi kuin kiinnitysaika, sillä kun jarrujohdon painetta aletaan kasvattaa, osa ilmapirrasta menee apuilmasäiliöiden täyttämiseen, ja täten paine kasvaa hitaammin kuin se jarrutuksessa putoaa. Ongelma on ratkaistu järjestelmällä, jossa jarrujohdon rinnalla junan läpi kulkee toinen paineilma-johto, jota kutsutaan pääsäiliöjohdoksi. Johdossa pidetään yllä noin 8...10 bar suuruinen paine. Jarrutuskäskyjen antaminen tapahtuu edelleen perinteistä jarrujohtoa käyttäen, mutta jarrujen irrotuksen aikana apuilmasäiliöt ladataan suoraan pääsäiliöjohdosta, mikä mahdollistaa nopeamman paineen kasvun jarrujohdossa. [1] Suomessa pääsäiliöjohdolla on varustettu moottorijunat sekä kaikki matkustajavaunut [14].

3.1.2 EP-jarrujärjestelmä

EP (Electro-pneumatic) -jarrujärjestelmällä tarkoitetaan paineilmajärjestelmää, jonka toimintaa ohjataan sähköisesti. EP-jarrujen suurin etu ja syy niiden olemassaoloon on se, että sähköisellä ohjauksella voidaan välittää jarrutuskäskyt kaikkiin vaunuihin lähes samanaikaisesti. Tällöin vältetään siltä ongelmalta, että jarrut kiinnittyvät eri aikoihin eri kohdissa junaa. EP-jarrujärjestelmää hyödynnetään Suomessa moottorijunakalustossa sekä kaksikerroksisissa matkustajavaunuissa [14]. EP-jarrujärjestelmiä on monia eri tyyppisiä, mutta niiden yhdistävä tekijä on paineilmajärjestelmän sähköinen ohjaus. Tyypillisen EP-järjestelmän periaatteellinen toimintakaavio on esitetty kuvassa 5. Tässä EP-järjestelmässä koko junan läpi kulkee jarrujohdon lisäksi myös ryhmä sähkökaapeleita. Veturissa oleva paineilmakompressorin ja -säiliön pitävät yllä jarrujohdon painetasoa kuten puhtaassa paineilmajärjestelmässäkin, mutta jarrutus- ja irrotuskäskyt lähetetään sähköisesti. Jarrujohdon tehtävä on vain ladata kunkin jarrun apuilmasäiliötä.



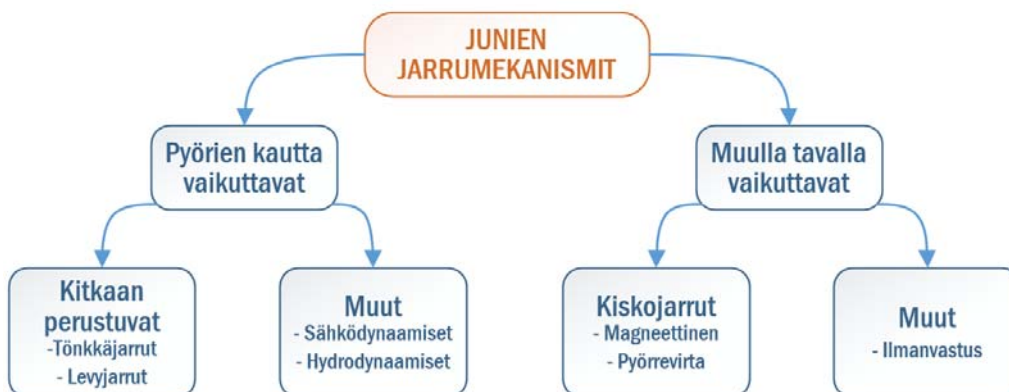
Kuva 5. Yhdentyypisen EP-jarrun sähköpneumaattinen kaavio. Piirretty lähteen [1] perusteella.

Kussakin jarrussa on mikroprosessoripohjainen jarrujen ohjausyksikkö eli BCU (brake control unit). BCU ohjaa yksikön jarrutusta kahden solenoidiventtiilin avulla, joista toinen yhdistää jarrusylinterin ulkoilmaan ja toinen apuilmasäiliöön. Venttiilit ovat proportionaalisia, ja BCU voi niiden avulla säätää jarrutusvoimaa ja -nopeutta sekä irrotusnopeutta. Kussakin jarrussa on lisäksi vielä kolmas solenoidiventtiili, joka on on/off-tyyppinen hätäjarrutusventtiili. Hätäjarrutusventtiiliä ei ohjaa BCU, vaan venttiili pidetään normaalissa toiminta-asennossa niin kutsutun turvapiirin avulla. Turvapiiri koostuu kahdesta sähkökaapelista, jotka kulkevat koko junan läpi ja joissa pidetään yllä tietty jännite. Viimeisessä vaunussa kaapelit on kytketty yhteen suljetun virtapiirin muodostamiseksi. Mikäli juna katkeaa tai virtapiiri rikkoutuu muusta syystä, hätäjarrutusventtiilit menettävät jännitteensä ja vaihtavat asentoa palautusjousten avulla. Tällöin, riippumatta BCU:n ohjaamien venttiilien asennosta, apuilmasäiliö kytkeytyy suoraan jarrusylinteriin ja seuraa täysivoimainen jarrutus.

3.2 Jarrumekanismit ja vuorovaikutus radan kanssa

Junissa käytetyt jarrumekanismit voidaan karkeasti jakaa kuvan 6 mukaisesti kahteen luokkaan: niihin, jotka vaikuttavat junan nopeuteen junan pyörien kautta ja niihin, jotka vaikuttavat junan nopeuteen muilla tavoilla. Pyörien kautta vaikuttavat jarrut voidaan puolestaan jakaa kitkaan perustuviin jarruihin sekä muulla tavalla akselien pyörimiseen vaikuttaviin jarruihin. [1] Pyörien kautta vaikuttavia jarrumekanismeja esitellään luvussa 3.2.1 ja muilla tavoilla vaikuttavia luvussa 3.2.2. Pyörien kautta vaikuttavien jarrujen toiminnan ymmärtämiseksi on tärkeää tuntea perusteet pyörän ja kiskon välisestä kitkasta, ja siksi luvussa 3.2.3 käsitellään tätä vuorovaikutusta.

Suomessa liikennöivissä henkilöjunissa käytetään rinnakkain kitka- ja kiskojarraja sekä dynaamisia jarruja. Näistä suomalaiset rautatieoperaattorit laskevat junan jarrutuskykyyn ainoastaan paineilmajärjestelmällä ohjatut kitkajarrut. Kitkajarrujen lisäksi henkilöjunissa on tyypillisesti hätäjarrutusta varten kiskojarra. Näiden kahden jarrutyypin lisäksi junissa hyödynnetään vetokalustoyksiköissä olevia dynaamisia jarruja. Suomessa dynaamisia jarruja käytetään ainoastaan lisäjarruina tehostamaan jarrutusta, eikä niiden vaikutusta huomioida jarrutuskykyä määritettäessä. Syy tähän on se, että junan täytyy kyetä jarruttamaan ennalta määrätyllä tavalla, vaikka ajo-johtimen sähkönsyötössä olisi häiriö. Tällöin sähködynaaminen jarrutus ei ole mahdollinen. Samasta syystä myöskään EP-jarrujärjestelmän vaikutuksia ei oteta jarrutuskyvyssä huomioon, sillä senkin toiminta häiriintyy sähkönsyötön häiriöiden seurauksena. [15] Tilanne on eri esimerkiksi Saksassa, jossa dynaamisten jarrujen ja kiskojarrajen vaikutus huomioidaan jarrutuskykyä määritettäessä.



Kuva 6. Jarrutyyppejen luokittelu. Mukailtu lähteestä [1].

3.2.1 Pyörien kautta vaikuttavat jarrumekanismit

Pyörän kautta vaikuttavista jarruista yleisimmin käytetään kitkajarruja. Kitkajarruissa junan liikkuviin osiin kohdistetaan kitkavoimia, joiden tekemän työn seurauksena junan vauhti hidastuu. Kitkajarruista käytetään yleisimmin tönkkä- tai levyjarruja, joiden konstruktio on esitetty kuvassa 7. Tönkkäjarruissa jarrupalat painautuvat suoraan pyörän kulkupintaa vasten, kun taas levyjarruissa kitkapintana toimii yksi tai useampi erillinen jarrulevy, jotka on sijoitettu akselille joko pyörien väliin, niiden ulkopuolelle tai niihin integroituna. Tönkkäjarrujen etuna ovat muun muassa yksinkertainen konstruktio sekä pyörän kulkupintaa puhdistava vaikutus. Tönkkäjarrujen

haittana puolestaan on pyöriin kohdistuva suuri rasitus. Levyjarruissa suurin etu on se, että jarrun ja pyörän kitkapintojen materiaalit ja pinnanlaadut voidaan suunnitella erikseen, kun taas heikkoutena on hankalampi huollettavuus monimutkaisemman konstruktion seurauksena. [1]

Toinen tärkeä pyörän kautta vaikuttava jarrutyyppi on dynaamiset jarrut. Dynaamisia jarruja on kahta eri tyyppiä, sähköisiä ja hydraulisia. Sähködynaaminen jarrutus tarkoittaa käytännössä sitä, että veturia tai junayksikköä kuljettavan sähkömoottorin sähkönsyöttö katkaistaan ja se kytketään generaattoriksi, jolloin se alkaa muuntaa junan liike-energiaa sähköenergiaksi. [1] Tämä sähköenergia voidaan joko muuntaa lämmöksi vastusten avulla, varastoida esimerkiksi superkondensaattoreihin tai vauhtipyöriin tai palauttaa sähkönsyöttöverkkoon [18]. Sähködynaamisen jarrutuksen suurimpia etuja ovat kulumattomuus ja suuri teho suurilla nopeuksilla. Alhaisemmilla nopeuksilla teho kuitenkin hiipuu.

Hydrodynaamisen jarrun toiminta perustuu hydraulisen voimansiirron käyttöön. Tätä käytetään dieselhydraulisissa vetureissa ja junayksiköissä. Hydrodynaamisessa jarrutuksessa hydraulinesteen virtaa rajoittamalla aiheutetaan hydraulijärjestelmään paine-eroja, joiden avulla muunnetaan junan liike-energia nesteen lämmitykseen. Ylimääräinen lämpö poistetaan hydraulijärjestelmästä lämmönvaihdinten avulla. [1].



(a) Tönkkäjarru [16].

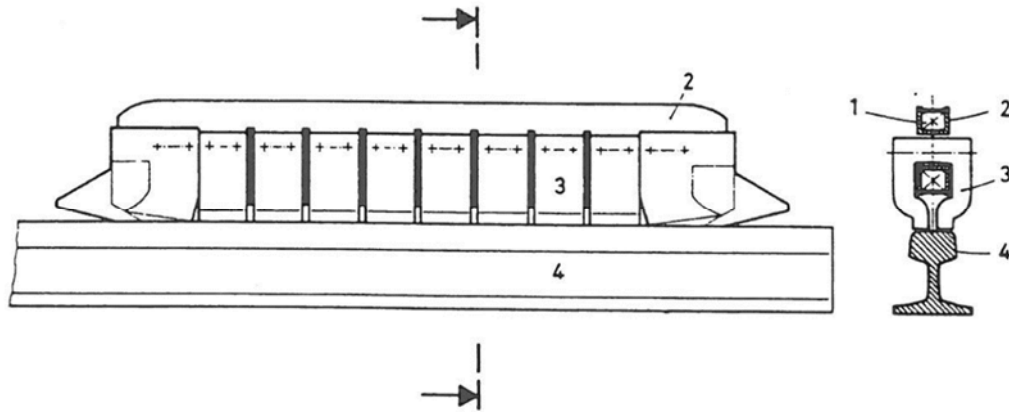


(b) Levyjarru [17].

Kuva 7. Tönkkä- ja levyjarrujen konstruktio.

3.2.2 Kiskoon vaikuttavat jarrumekanismit

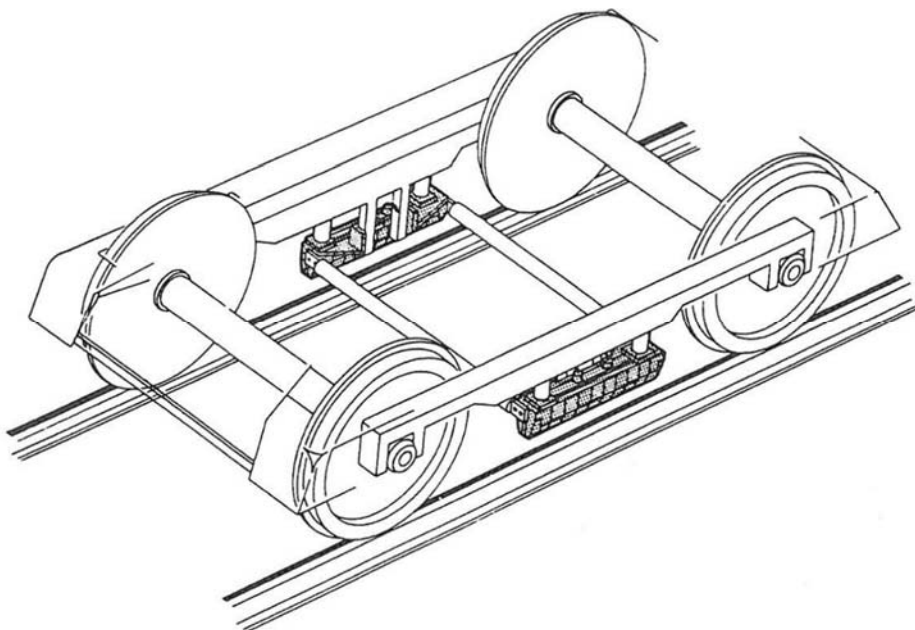
Magneettisessa kiskojarrussa jarrupala painautuu suoraan kiskon pintaa vasten. Jarrutettaessa jarrupala lasketaan alas paineilmajärjestelmän avulla, ja jarrun sähkömagneetti aktivoidaan. Tällöin magneettinen vuorovaikutus vetää jarrupalan kiinni kiskoon. Jarrupalan rakennetta on havainnollistettu kuvassa 8 ja kiinnitystä teliin kuvassa 9. Jarrutus tapahtuu aina täydellä voimalla, eikä sen voimakkuuteen voi vaikuttaa. Magneettinen kiskojarru aiheuttaa huomattavaa räsytystä ja kulumaa kiskolle, joten sitä käytetään tyypillisesti vain hätäjarrutuksissa. [1, 2]



Kuva 8. Kiskojarrupalan rakenne. Kuvassa 1) kela, 2) kelarunko, 3) rautasydän, 4) kisko. [2]

Kiskojarrun käyttämisessä on monia etuja. Koska jarrun tuottama voima kohdistuu suoraan kiskoon, ei kiskojarrun tehokkuus ole riippuvainen pyörän ja kiskon välisestä kitkasta. Esimerkiksi keliolosuhteilla ei juurikaan ole vaikutusta kiskojarrun vaikutusvoimaan. Lisäksi kiskojarrun kiskoon aiheuttama hankaus puhdistaa kiskon pintaa ja parantaa näin kiskojarrun jälkeisten pyörien adheesiota kiskoon. [2] Suomessa kiskojarrun käyttö ei ole pakollista, vaan se on junaoperaattorin omassa harkinnassa. [14]

Magneettisten kiskojarrujen haittapuolia on pyritty eliminoimaan kehittämällä pyörrevirtoihin perustuvia kiskojarraja. Näissä jarruissa jarrupalojen ja kiskojen välillä ei ole kontaktia lainkaan, vaan jarrutusvoima perustuu pyörrevirtoihin, jotka jarrupalojen luoma voimakas magneettikenttä indusoi kiskoihin. Pyörrevirtajarrujen ongelmana ovat kuitenkin kiskojen voimakas lämpeneminen sekä radan turvalaitteisiin aiheutuvat sähkömagneettiset häiriöt. [2] Vaikka pyörrevirtajarruja on kehitetty jo useamman vuosikymmenen ajan, eivät ne näistä syistä johtuen ole vielä laajamittaisessa käytössä [3].



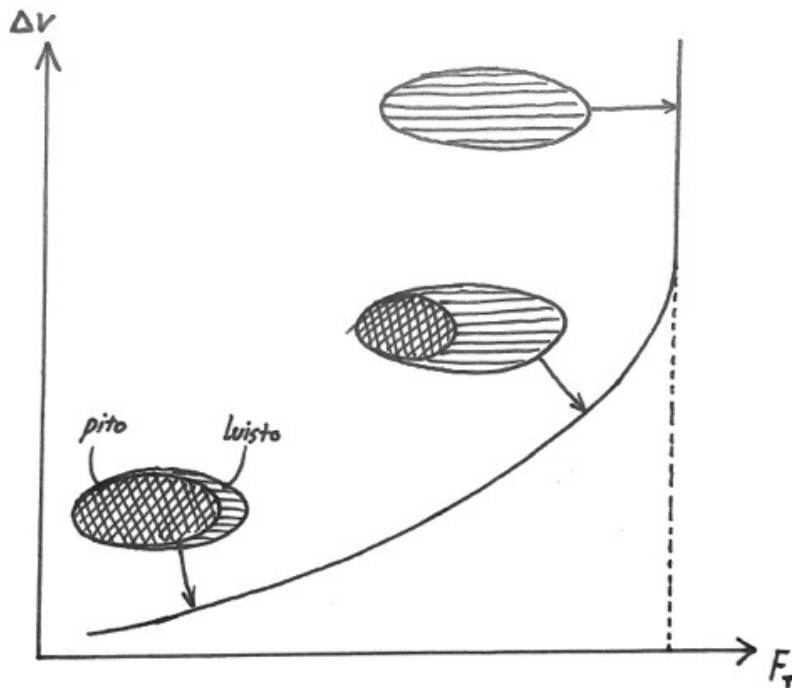
Kuva 9. Kiskojarrujen kiinnitys teliin [2].

3.2.3 Kiskon ja pyörän välinen kitka

Tribologisessa mielessä kiskon ja pyörän välinen vuorovaikutus on vierivä teräs–teräs-kontakti. Kontaktipinta-ala on tässä vuorovaikutuksessa karkeasti ellipsin muotoinen ja materiaalien jäykkyydestä johtuen hyvin pieni, tyypillisesti noin 1 cm^2 pyörää kohden. Kontakti on myös lähes suojaton ulkoisia häiriötekijöitä vastaan. Näistä syistä kitkakerroin kiskon ja pyörän välillä ei ole vakio, vaan siihen vaikuttavat suuresti muun muassa epäpuhtaudet, pienhiukkaset ja kosteus. Erityisesti syksyisin pudonneet lehdet aiheuttavat rautatieliikennöinnille haasteita, sillä murskautuessaan junan pyörien alle lehdet muodostavat kiskon pintaan liukkaan kerroksen, joka alentaa kontaktin kitkakerrointa huomattavasti ja jota on vaikea poistaa. [19] Luonnollisesti myös kiskon ja pyörän ominaisuuksilla on vaikutus kontaktin luonteeseen ja kitkakertoimen suuruuteen. Tärkeimpiä näistä tekijöistä ovat materiaalit [2], sekä kulkupintojen pinnan karheuden suuruus ja orientaatio, joiden vaikutus korostuu märissä olosuhteissa [20].

Ideaalitilanteessa, eli täysin kuivalla ja puhtaalla kiskolla, kiskon ja pyörän välisen kitkakertoimen suuruus on noin $0,25 \dots 0,30$. Kosteissa olosuhteissa kitkakerroin on puolestaan noin $0,10 \dots 0,20$. Lehtien peittämällä kiskolla kitkakerroin on vieläkin alempi, jopa $0,05$ tai alle. [19] Kitkakerroin siis vaihtelee suuresti ja monesta muuttujasta riippuen. Kerroin voi myös muuttua hyvinkin nopeasti ja ennustamattomasti. Tästä syystä rautatiekaluston jarruja ei juurikaan mitoiteta hyödyntämään suurempaa kitkakerrointa kuin $0,15$. [2]

Eräs vierivän kontaktin ominaisuuksista on sekä luisto- että pitoalueiden syntyminen kontaktialalle kuvassa 10 esitetyllä tavalla. On huomioitavaa, että sekä kisko että pyörä myötäävät kontaktissa hieman. Näin ollen kun pyörään kohdistetaan joko jarruttava tai kiihdyttävä momentti, pyörä litistyy hieman kontaktialan siltä reunalta, johon momentin aiheuttama voima kohdistuu. Tälle reunalle syntyy pitoalue, jonka avulla pyörä välittää voiman kiskoon. Samanaikaisesti havaitaan, että pyörän kehänopeuden ja etenemisnopeuden välille syntyy ero eli luisto. Kontaktialan pitoalueen ulkopuolella pinnat liikkuvat siis eri nopeuksilla, mistä aiheutuu liukuva kontakti. [21] Kuvassa 10 on myös havainnollistettu sitä, että pitoalueen osuus kontaktialasta riippuu pyörän kehällä vaikuttavasta tangentiaalivoimasta. Kun voima kasvaa riittävän suureksi, pitoalue katoaa kokonaan ja kontakti muuttuu täysin luistavaksi. Kiihdytyksessä tämä johtaa niin kutsuttuun ympärilyöntiin eli sutimiseen, ja jarrutuksessa puolestaan pyöräkerran lukkiutumiseen. [19]



Kuva 10. Luisto- ja pitoalueet sekä niiden riippuvuus tangentiaalivoimasta kiskon ja pyörän välisessä kontaktissa. Piirretty lähteen [19] perusteella.

Jos pyöräkerta lukkiutuu liian suuren jarrutusvoiman seurauksena, se alkaa liukua kiskojen pinnalla. Pyöräkerran lukkiutuminen johtaa jarrutusmatkojen huomattavaan pitenemiseen. Lisäksi lukkiutuneisiin pyöräkertoihin syntyy nopeasti lovi. Lovella tarkoitetaan tässä yhteydessä pyörän kulkupinnalle syntyvää tasomaiseksi kulunutta kohtaa. Lovipyörä aiheuttaa sekä vaunua että kiskoa kuluttavia iskumaisia tärähdyksiä kulkiessaan. Lisäksi matkustusmukavuus kärsii ja junan aiheuttamat meluhaitat voimistuvat. Lovipyörä voidaan tiettyyn rajaan asti korjata sorvaamalla, mutta liikennöitsijälle tämä on ylimääräinen kuluerä. Jarrujen lukkiutuminen täytyy pyrkiä estämään pitämällä jarrutusvoima tietyissä rajoissa, jotka kiskon ja pyörän välinen kitkakerroin asettaa. [2]

Lukkiutumista pyritään ehkäisemään pääasiassa kolmella tavalla. Yksi tapa on muokata kiskon ja pyörän välistä kitkakerrointa lisäaineiden avulla. Tehokas ja laajalti käytetty lisäaine on hiekka. Useissa vetureissa on pyörien edessä suutin, josta kuljettaja voi tarvittaessa syöttää hiekkaa suoraan pyörän alle. Tämä aiheuttaa kuitenkin huomattavia kulumisvaurioita sekä pyörälle että kiskolle. Lisäaineena voidaan käyttää myös voiteluainetta, joka kuivuu kiskon tai pyörän pintaa ohueksi kalvoksi. Voiteluaineen avulla pyritään vakioimaan kitkakerroin välille 0,20...0,40. Tämänkaltaisilla voiteluaineilla on tehty lupaavia kokeita, mutta niiden haittana ovat tiheä lisäämistarve sekä eristävät ominaisuudet, jotka haittaavat raidevirtapiirien toimintaa. [19] Lisäaineiden lisäksi jarrujen lukkiutumista voidaan ehkäistä erityisellä luistonestolaitteella, joita käytetään erityisesti henkilöliikennekalustossa. Luistonestolaitteita on sekä sähköisesti että mekaanisesti toimivia. Molemmat perustuvat kuitenkin siihen, että mikäli laite havaitsee pyöräkerran lukkiutuvan, se avaa automaattisesti venttiilin jarrusylinterin ja ulkoilman välillä, mikä puolestaan alentaa jarrupalaa työntävää painetta ja johtaa jarruvoiman alenemiseen. Kolmas tapa lukkiutumisen ehkäisemiseen on käyttää joko kiskoon tai pyörän kulkukehään vaikuttavia kitkajarruja, jotka jarrutettaessa muokkaavat kontaktipintojen pinnan-karheutta. [2]

4 Jarrutuskykyvaatimukset

Tässä luvussa esitellään nykyiset sekä aikaisemmat jarrutuskykyvaatimukset, joiden mukaan liikennöintiä Suomen valtion rataverkolla on säännelty. Ensin luvussa 4.1 kuvaillaan aiemmin käytössä ollut, jarruakseliprosenttina tunnettu järjestelmä junan jarrutuskyvyn määrittämiseksi sekä käsitellään sen heikkoudet. Sen jälkeen kuvaillaan nykyinen järjestelmä. Suomessa käytetään tällä hetkellä jarrutuskyvyn määrittämiseen jarrupainojärjestelmää, joka on vakiintunut standardiksi myös suuressa osassa muuta maailmaa [1, 6]. Luvussa 4.2 käsitellään jarrupainojärjestelmän perusteet sekä tällä hetkellä Suomessa voimassa olevat jarrutuskykyvaatimukset. Luvussa 4.3 puolestaan käsitellään jarrupainojärjestelmän ja jarrutuskykyvaatimusten konkreettinen toteutus Suomessa, sekä toteuttamiseen olennaisesti liittyvän junien kulunvalvontajärjestelmän (JKV) toimintaperiaatteet.

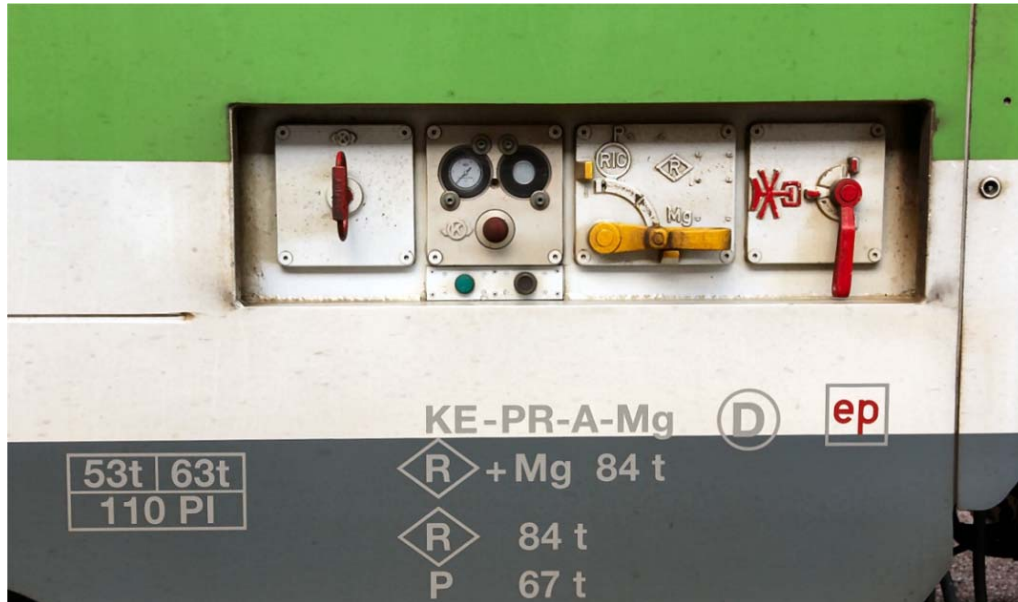
4.1 Aikaisempi menetelmä jarrutuskyvyn määrittämiseksi

Ennen jarrupainojärjestelmän käyttöönottoa junan suurin sallittu nopeus määriteltiin jarruakseliprosentin mukaan. Jarruakseliprosentti on junan jarruttavien pyöräkertojen määrän suhde koko junan akselilukuun. Lisäksi järjestelmässä otettiin huomioon radan pituuskaltevuus. Liikkuvan kaluston ominaisuuksista otettiin huomioon ainoastaan jarruttavien akseleiden määräeikä esimerkiksi vaunutyyppejä, kuorman määrää, tai edes sitä, oliko kyseessä matkustajavai tavaravaunu. ”Joitakin kertoimia” oli kuitenkin tiettävästi käytössä. Kaikki muu oli kuljettajan oman harkinnan ja ammattitaidon varassa. [10] On selvää, että tällainen laskentatapa junan jarrutuskyvylle on epävarma eikä sovellu järjestelmään, jossa junien kulkua valvotaan ja ohjataan tietokoneavusteisesti. Kun lisäksi monissa UIC:n jäsenvaltioissa oli jo 1980-luvulle tultaessa siirrytty käyttämään jarrupainojärjestelmää, oli Suomessakin luonnollista siirtyä pois vanhasta järjestelmästä.

4.2 Jarrupainojärjestelmä

Jarrupainojärjestelmän avulla kuvataan junan jarrutuskykyä. Järjestelmässä jokaiselle junakalustoyksikölle on erikseen laskettu suure, joka kuvaa kalustoyksikön tuottaman jarrutusvoiman suuruutta. Tätä suuretta kutsutaan jarrupainoksi, ja sen yksikkö on tonni (t). Nimestään huolimatta jarrupainolla ei ole mitään tekemistä junan massan kanssa. Kunkin kalustoyksikön jarrupaino on pysyvästi merkitty kalustoyksikön kylkeen. Yksikössä käytettävän jarrulajin valinnalla voidaan vaikuttaa yksikön jarrupainoon. Tällöin yksikön kaikki mahdolliset jarrupainot on lueteltu yksikön kyljessä. Valinta tapahtuu manuaalisesti valintakahvaa käyttäen. Joissakin vetävissä kalustoyksiköissä valinta voidaan myös tehdä ohjaamosta käsin. [9] Kuvassa 11 on esitetty esimerkki jarrupainon kylkimerkinnoista.

Tällä hetkellä voimassa olevat jarrutuskykyvaatimukset Suomen rataverkolla määritellään jarrupainoprosentin avulla. Jarrupainoprosentti on suure, joka kuvaa junan jarrutuskykyä suhteessa sen massa. Jarrupainoprosentista käytetään tyypillisesti symbolia λ , ja se määritellään kaavan 1 mukaan. Kaavan tulos pyöristetään alaspäin lähimpään kokonaislukuun. [9]



Kuva 11. Edb-tyyppisen vaunun jarrulajivalitsin ja jarrupainomerkinnät. Valintakahva on kuvan keltainen vipu. Merkinnöissä on annettu jarrupainon lukuarvot jarrulajeille R + Mg (jarrulaji R ja magneettinen kiskojaru), R sekä P. [9] On huomionarvoista, että lajien R sekä R + Mg jarrupainot ovat identtiset – tämä johtuu siitä, ettei kiskojarun vaikutusta oteta Suomessa huomioon jarrutuskyvyn määrittelyssä.

$$\lambda = \frac{B}{m_{st}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

missä λ on jarrupainoprosentti [%]
 B on junan yksiköiden yhteenlaskettu jarrupaino [t]
 m_{st} on koko junan staattinen massa [t].

Liikenneviraston ohjeessa [8] määrätään, että valtion rataverkolla liikennöivän junan jarrupainoprosentin tulee kaikissa tilanteissa olla vähintään 18. Lisäksi junan suurin nopeus vaikuttaa jarrupainoprosentin vaadittuun suuruuteen taulukon 2 mukaisesti.

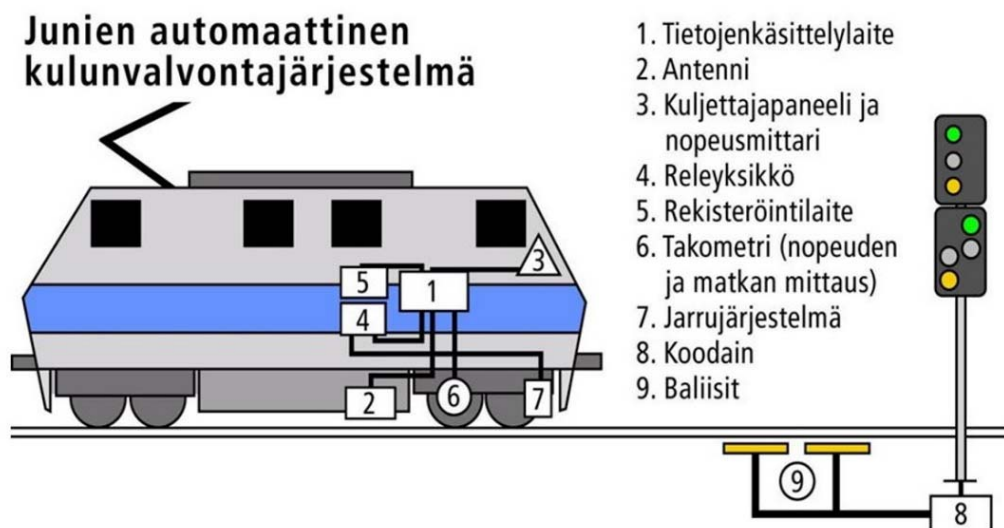
Taulukko 2. Junakaluston nykyiset jarrutuskykyvaatimukset Suomessa [8].

Sn enintään [km/h]	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	220
λ vähintään [%]	18	25	36	52	55	85	114	125	128	132	135

Jos esimerkiksi junan suurin nopeus on 110 km/h, vaaditaan jarrupainoprosentiksi vähintään 85. Vastaavasti, jos junan jarrupainoprosentti on 40, niin junan suurimmaksi nopeudeksi voidaan määrätä korkeintaan 80 km/h.

4.3 JKV ja jarrupainojärjestelmän implementointi

Suomessa rautateillä liikennöimisen turvallisuus varmistetaan junien kulunvalvontajärjestelmällä (JKV), jonka piiriin kuuluu valtaosa Suomen rataverkosta. JKV on järjestelmä, jossa junat kommunikoivat rataverkon kanssa automaattisesti välittäen kuljettajalle tietoa esimerkiksi edessä olevista opastimista ja nopeusrajoituksista. JKV:hen kuuluvilla rataverkon osilla on rataa kiinnitettynä baliiseja, jotka ovat junan tunnistavia lähettämiä. Veturissa, moottorivaunuissa ja ohjausvaunuissa on JKV-laite, joka kommunikoi baliisien kanssa kontaktittomasti ja välittää informaation kuljettajalle sekä tarvittaessa ohjaa junan toimintaa. [6] JKV-laitteistoon kuuluvat pääkomponentit on esitetty kuvassa 12, ja kuvassa 13 puolestaan on havainnollistettu baliisin ulkonäköä ja asennusta raiteeseen. JKV-laite ei ole edellytys valtion rataverkolla liikennöintiin, mutta mikäli junassa ei ole JKV-laitetta tai se on epäkunnossa, on junan suurin nopeus rajoitettu 80 km:iin/h [22]. Tällöin kuljettaja joutuu ohjaamaan junaa puhtaasti opastinten antamien tietojen perusteella.



Kuva 12. JKV:n veturi- ja ratalaitekomponentit [22]



Kuva 13. Baliisi [23].

Informaation välittämisen lisäksi JKV:n toinen tärkeä tehtävä on junan automaattinen ohjaaminen. JKV:n toiminnan lähtökohtana on kuitenkin, että järjestelmä ei puutu junan kulkuun niin kauan, kun kuljettaja ajaa junaa opasteiden ja nopeusrajoitusten mukaisesti [24]. Automaattisen ohjaamisen mahdollistamiseksi kuljettaja syöttää junan muodostamisen jälkeen tai junatietojen muuttuessa JKV-laitteelle junan

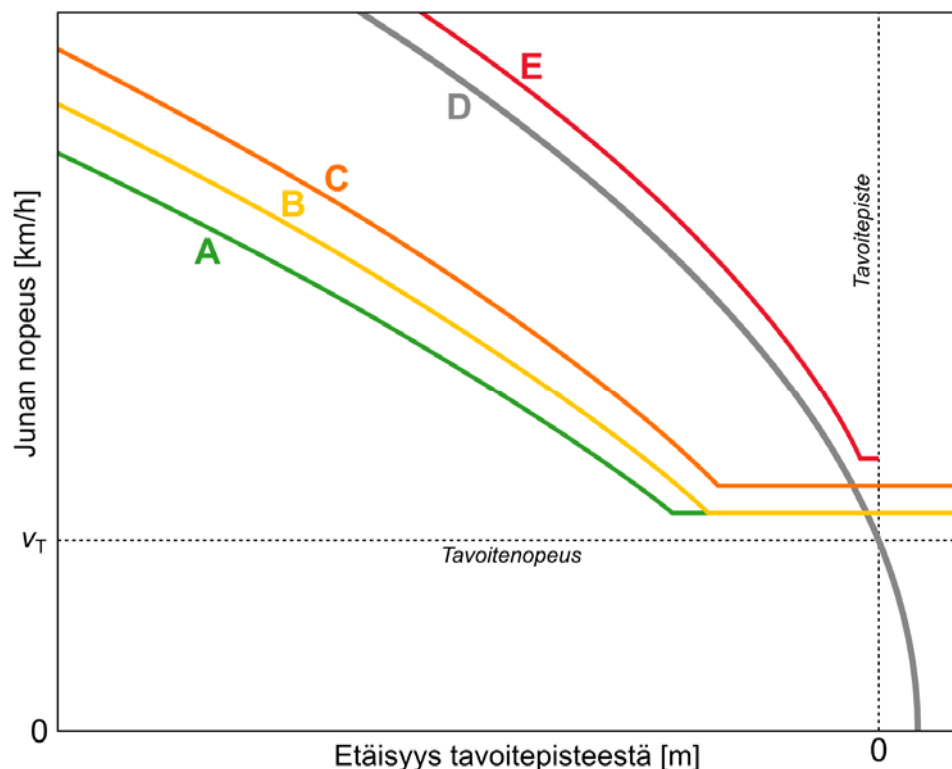
- jarrulajin tai moottorijunayksikön tyyppin
- suurimman nopeuden
- pituuden
- painon, jos juna on veturivetoinen
- jarrupainon, jos juna on veturivetoinen. [6]

Kun juna ylittää seis-opastetta edeltävän baliisin, JKV-laite saa tiedon kyseisen opastinvälin pituudesta, nopeusrajoituksesta ja määräävästä kaltevuudesta. Näiden tietojen sekä kuljettajan syöttämien junakohtaisten tietojen perusteella JKV-laite laskee jarrutuskäyrästön käyttäen omaa sisäistä laskentamentelmäänsä. Tätä laskentamenetelmää kutsutaan tässä työssä jäljempänä JKV-menetelmäksi, ja sen sisältö on kuvailtu tarkemmin luvussa 5.1.2. Junan tulee tämän laskentamenetelmän mukaan noudattaa käyrästöä pysähtyäkseen ennen opastinta. Jarrutuskäyrät ovat funktioita, jotka määräävät tietyn nopeuden tietyllä etäisyydellä seis-opasteesta. JKV:n jarrutuskäyrästössä on viisi pääasiallista käyrää, jotka on nimetty kirjaintunnuksin A–E. Mikäli jokin jarrutuskäyrästä ylitetään, JKV suorittaa oman logiikkansa mukaisesti tietyn toimenpiteen. Jarrutuskäyrien merkitykset on annettu taulukossa 3. Esimerkki JKV:n jarrutuskäyrästöstä on esitetty kuvassa 14, ja veturilaitteen jarrutustapahtuman aikana käyttämää logiikkaa kuvaava vuokaavio on esitetty kuvassa 15. Jarrutuskäyrien laskentakaavat on kuvailtu tarkemmin luvussa 5.1.2.

Taulukko 3. JKV:n jarrutuskäyrien toiminnallisuudet [24].

Käyrä	Nimi	Kuvaus
A	Jarruta	Kuljettaja saa ensimmäisen tiedon edessä olevasta seisopasteesta. Järjestelmä kehottaa kuljettajaa jarruttamaan.
B	Jarruta lisää	Kuljettaja saa varoituksen jarrutustarpeesta, mikäli kuljettaja ei ole huomannut kehotusta tai juna ei jarruta riittävästi.
C	Käyttöjarrituksen aloitus	JKV aloittaa automaattisesti käyttöjarrituksen ja jatkaa sitä niin kauan, kunnes juna on saavuttanut valvontanopeuden. Tässä vaiheessa kuljettaja ei voi vaikuttaa junan jarrutukseen.
D	Käyttöjarrutus	Peruskäyrä, jonka mukaan muut käyrät lasketaan.
E	Hätäjarrutus	Mikäli nopeus ei ole alentunut riittävästi edes automaattisella käyttöjarrituksella, JKV aktivoi hätäjarrituksen (jarrujohdon tyhjennys sekä kiskojarut). Hätäjarrutus jatkuu niin kauan, kunnes junan nopeus alittaa valvontanopeuden.

JKV tullaan vuosien 2020–2040 aikana korvaamaan Euroopan yhtenäistetyllä kulunvalvontajärjestelmällä ETCS (European Train Control System) [22]. Tämän järjestelmän ominaisuuksista ja laskentamenetelmästä kerrotaan tarkemmin luvussa 5.1.3.



Kuva 14. Esimerkki JKV:n jarrutuskäyrästä. Mukailtu lähteestä [24].

5 Työssä käytetyt menetelmät

Tässä luvussa esitellään työssä käytetyt laskentamenetelmät jarrutusmatkan arvioimiseksi. Menetelmät kuvaillaan luvussa 5.1. Luvussa 5.2 analysoidaan laskentamenetelmien luotettavuutta ja eroavaisuuksia sekä vertaillaan niiden antamia tuloksia todellisten jarrutuskokeiden tuloksiin.

5.1 Jarrutusmatkan laskentamenetelmät

Tässä luvussa esitellään viisi erilaista laskentamenetelmää junan jarrutusmatkan arvioimiseksi. Ennestään olemassa olevia menetelmiä näistä ovat Mindenin kaava, JKV-järjestelmän laskentamenetelmä sekä ETCS-järjestelmän laskentamenetelmä. Näiden lisäksi työssä myös johdetaan fysiikan perusteista lähtien uusi laskentatapa. Lopuksi työssä kehitetään vielä simulaatiomalli, jolla voidaan simuloida fysiikan kaavoihin perustuvaa laskentamenetelmää ottaen huomioon monimutkaisia muuttujia, kuten ilmanvastus.

5.1.1 Mindenin kaava

Mindenin kaava (Mindener Formel) on saksalaisen Friedrich Sauthoffin vuonna 1961 kehittämä laskentamenetelmä junan pysähtymismatkan arvioimiseksi. Menetelmä perustuu empiirisesti määriteltyihin kertoimiin, joiden avulla junan lähtönopeudesta, jarrupainoprosentista ja radan kaltevuudesta saadaan junan pysähtymismatka. Menetelmässä on kaksi eri kaavaa pysähtymismatkalle, joista toinen pätee R- ja P-jarrulajeille ja toinen G-jarrulajille. [25] Koska tässä työssä tarkastellaan lähes yksinomaan nopeasti ja voimakkaasti reagoivaa R-jarrulajia käyttäviä kaukojunia, esitellään seuraavaksi ainoastaan tähän laskentaan liittyvät seikat. Mindenin kaavan [25] mukaan pysähtymismatka R-jarrulajilla on

$$s = \frac{3,85 v_0^2}{6,1 \psi \left(1 + \frac{c_1 \lambda}{10}\right) + c_2 i} \quad (2)$$

missä

- s on pysähtymismatka [m]
- v_0 on junan nopeus jarrutuksen aloitushetkellä [km/h]
- ψ on junan jarrutyypistä ja -lajista sekä nopeudesta riippuva kerroin [-]
- c_1 on junan akseliluvusta riippuva kerroin [-]
- λ on junan jarrupainoprosentti [%]
- c_2 on junan nopeudesta riippuva kerroin [-]
- i on radan pituuskaltevuus pysähtymismatkalla [‰].

R-jarrulajilla voidaan olettaa $c_1 = 1$ akseliluvusta huolimatta. Kertoimen ψ arvo R-jarrulajia käyttävälle levyjarrulliselle junalle on

$$\psi = 0,3683 + 15521 \frac{v_0}{100} - 1,2952 \left(\frac{v_0}{100}\right)^2 + 0,3668 \left(\frac{v_0}{100}\right)^3 \quad (3)$$

Kertoimen c_2 arvo R-jarrulajia käyttävälle junalle on

$$c_2 = \begin{cases} 0,5265 + 0,7578 \frac{v_0}{100} - 0,3826 \left(\frac{v_0}{100} \right)^2, & v_0 \leq 90 \\ 0,9, & v_0 > 90 \end{cases} \quad (4)$$

On huomioitavaa, että keliolosuhteista johtuvaa käytettävissä olevan kitkakertoimen muuttumista ei oteta Mindenin kaavassa mitenkään huomioon. Tämän vuoksi kaava ei välttämättä ole vertailukelpoinen muiden menetelmien kanssa, joissa muuttuneet kitkaolosuhteet otetaan huomioon.

5.1.2 JKV-menetelmä

JKV-laite laskee jarrutuskäyrästä käyttäen laskenta-algoritmia, jota tässä työssä kutsutaan JKV-menetelmäksi. Kuten luvussa 4.3 todettiin, jarrutuskäyrästä lähtökohtana on käyttöjarrutus- eli D-käyrä. JKV-menetelmässä D-käyrä lasketaan keskimääräiseen vakiohidastuvuuteen perustuen yhtälön 5 mukaisesti. Mikäli kaavan tavoitenopeudeksi asetetaan 0, kaava kuvaa lyhyintä mahdollista jarrutusmatkaa ilman hätäjarrutusta, kun ei oteta huomioon jarruvoiman kehittymiseen kuluva aikaa tai muita viiveitä.

$$s_D = \frac{v_0^2 - v_T^2}{2b} \quad (5)$$

missä s_D on käyttöjarrutuskäyrän etäisyys tavoitepisteestä [m]
 v_0 on junan nopeus jarrutuksen aloitushetkellä [m/s]
 v_T on junan tavoitenopeus [m/s]
 b on junan keskimääräinen hidastuvuus [m/s²].

Junan hidastuvuus b määritellään eri tavalla moottorijunille ja veturivetoisille junille. Jokaiselle moottorijunatyypille on ennalta määritetty ominaishidastuvuus b_0 . Tämän työn kannalta olennaisten moottorijunatyypien ominaishidastuvuudet ovat $b_0 = 1,05 \text{ Sm}^3$:lle ja $b_0 = 1,10 \text{ Sm}^6$:lle [24]. Veturivetoisille junille b_0 :n arvo puolestaan lasketaan jarrupainoprosentista kaavan 6 avulla. Kaava pätee R-jarrulajia käyttävälle henkilöjunalle, jonka $s_n \geq 120 \text{ km/h}$ ja joka suorittaa täysivoimaisen käyttöjarrutuksen. Koska kaikki työssä käsiteltävät junat täyttävät nämä kriteerit, ei muita tapauksia tarvitse tässä käsitellä.

$$b_0 = \frac{7\lambda + 100}{1000} \quad (6)$$

missä λ on junan jarrupainoprosentti [%].

Junan keskimääräisessä hidastuvuudessa b huomioidaan junan ominaisuuksien lisäksi ympäristön vaikutukset. Sen suuruus saadaan kaavan 7 mukaisesti.

$$b = b_0 k_s k_v + \frac{i}{100} \quad (7)$$

missä k_s on kelin mukaan määräytyvä kerroin [-]
 k_v on nopeudesta riippuva kerroin [-]
 i on radan pituuskaltevuus [‰].

Kertoimen k_s arvon määrittää kuljettaja oman näköhavaintonsa ja kokemuksensa perusteella. Kerroin voi saada kolme eri arvoa, jotka on määritelty taulukossa 4. Kerroin k_v puolestaan kuvaa levyjarrujen liukukitkakertoimen riippuvuutta junan nopeudesta ja määräytyy taulukon 5 mukaan.

Taulukko 4. JKV-menetelmän kelikertoimet [24].

Keli	Kuvaus	k_s
1	Hyvä keli	1,000
2	Normaali keli	0,875
3	Huono keli	0,750

Taulukko 5. JKV-menetelmän k_v -kertoimen riippuvuus lähtönopeudesta [24].

v_o [km/h]	k_v	v_o [km/h]	k_v
0...150	1,000	201...210	0,934
151...160	0,989	211...220	0,923
161...170	0,978	221...230	0,912
171...180	0,967	231...240	0,901
181...190	0,956	241...250	0,890
191...200	0,945	251...	0,879

Kun D-käyrä on laskettu, JKV laskee sen perusteella jarrutuskäyrät A–C sekä E. Näistä ensimmäisenä lasketaan C-käyrä, joka on käyristä mahdollisesti tärkein. Se määrittelee etäisyyden, jolla jarrutus on aloitettava, jotta juna pysähtyy käyttöjarrutuksella ennen opastinta. C-käyrän etäisyys tavoitepisteestä on

$$s_C = s_D + v(t) \left[t_s + t_a + t_b \left(1 - \frac{\Delta p}{p_0} \right) \right] + s_0 \quad (8)$$

missä $v(t)$ on junan hetkellinen nopeus [m/s]
 t_s on järjestelmäviive, jonka suuruus on 1 s
 t_a on kiihdytysviive. Jos junan kiihtyvyys on yli 0,2 m/s² kun A-käyrä ylitetään, $t_a = 5$ s ja muuten $t_a = 0$ s
 t_b on jarruvoiman kehittymisaika [s]
 Δp on kuljettajan tekemä paineenalennus jarrujohdossa [kPa]
 p_0 on tarvittava paineenalennus jarrutuksessa [kPa]
 s_0 on turvamarginaali [m].

Kaavan 8 jarruvoiman kehittymisaika t_b on aika, joka kuluu junan jarrutusvoiman noustessa 0:sta 95 %:iin maksimiarvostaan. Moottorijunille jarruvoiman kehittymisaika on taulukkoarvo, sillä tässä työssä käsiteltävät moottorijunatyypit Sm3 ja Sm6 on varustettu EP-jarruin. EP-jarruilla saavutetaan lyhyempi jarruvoiman kehittymisaika, sillä kaikissa vaunuissa jarrusylinterien paine nousee lähes samanaikaisesti. Molemmille moottorijunatyypeille voidaan käyttää $t_b \approx 4$ s [26, 27]. Veturivetoisille junille jarruvoiman kehittymisaika on

$$t_b = 4 + \frac{L}{80} \quad (9)$$

missä L on junan pituus [m].

Kaavan 8 turvamarginaali s_0 on ylimääräinen varoetäisyys, joka lisätään C- ja D-käyrien väliseen etäisyyteen. Sen suuruus määritellään junan hetkellisen nopeuden funktiona. Maksimissaan turvamarginaalin pituus on 200 m. Turvamarginaali lasketaan kaikkien tässä työssä käsiteltyjen junakokoonpanojen osalta samalla kaavalla, joka on

$$s_0 = \min(10 + 5v(t), 200) \quad (10)$$

B-käyrän etäisyys tavoitepisteestä vastaa etäisyyttä, josta 4 sekunnin kuluttua juna ylittää C-käyrän senhetkellä nopeudella. Tällöin kuljettaja saa varoituksen jarrutus-tarpeesta. B-käyrän etäisyys tavoitepisteestä on

$$s_B = s_C + 4v(t) \quad (11)$$

A-käyrän etäisyys tavoitepisteestä vastaa etäisyyttä, josta 8 sekunnin kuluttua juna ylittää C-käyrän senhetkellä nopeudella. Tällöin kuljettaja saa ensimmäisen tiedon edessä olevasta seisopasteesta. A-käyrän etäisyys tavoitepisteestä on

$$s_A = s_C + 8v(t) \quad (12)$$

E-käyrän etäisyys tavoitepisteestä vastaa etäisyyttä, jossa D-käyrän ylityksestä on kulunut 2 sekuntia, mutta junan nopeus ei ole alentunut. Tällöin JKV-järjestelmä aloittaa automaattisen hätäjarrutuksen. Sen suuruus on

$$s_E = s_D + 2v(t) \quad (13)$$

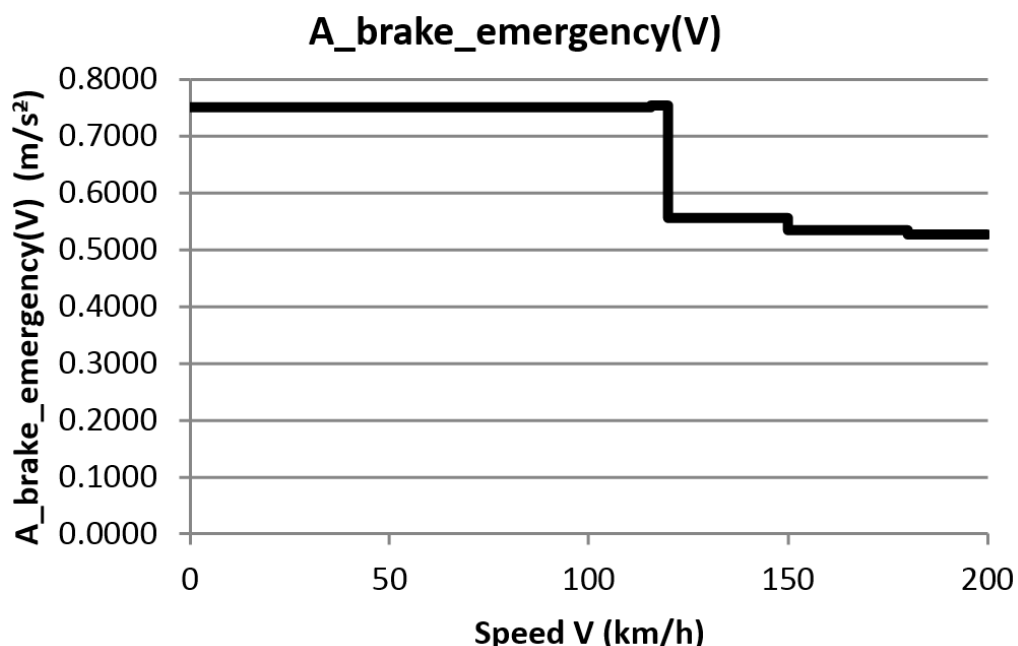
5.1.3 ETCS-menetelmä

ETCS-laitteen käyttämä jarrutuskäyrälaskenta-algoritmi eroaa huomattavasti JKV:n laskenta-algoritmista. Päällimmäisenä erona on, että ETCS ohjaa lähtökohtaisesti ainoastaan hätäjarrutusta. ETCS voidaan asettaa ohjaamaan myös käyttöjarrutusta, mutta tätä käsitellään optiona eikä vakioituna ominaisuutena. Tästä johtuen siinä missä JKV:n jarrutuskäyrästä pohjautuu käyttöjarrutuskäyrään, ETCS:n mallin pääkäyrä on EBD-käyrä (emergency brake deceleration). EBD-käyrän tarkoitus on antaa etäisyys, jolla juna riittävällä luottamustasolla pysähtyy täysivoimaisella hätäjarrutuksella tavoitepisteeseen. EBD-käyrän perusteella lasketaan käyrästä muut käyrät, joista tärkeimmät ovat kehotuskäyrä I (indication), varoituskäyrä W (warning), käyttöjarrutuksen aloituskäyrä SBI (service brake intervention) ja hätäjarrutuksen aloituskäyrä EBI (emergency brake intervention). [28] Käytännössä nämä käyrät vastaavat JKV:n A-, B-, C- ja E-käyriä.

Yksinkertaistettuna ETCS-algoritmin toimintaperiaate on, että junan hetkellisen nopeuden ja paikan perusteella junalle ja radalle ominaisista hidastuvuusprofileista lasketaan junan hetkellinen hidastuvuus. Tämän jälkeen edetään ajassa yhden aika-askeleen verran ja lasketaan junan uusi paikka ja nopeus hetkellisen hidastuvuuden perusteella. Tätä iteraatiota jatketaan, kunnes juna on pysähtynyt. Koska ETCS-algoritmin tarkempi rakenne on hyvin pitkä ja monimutkainen, ei ole tässä työssä katsottu tarpeelliseksi esittää sen toimintaa kaavojen tarkkuudella. Dokumentaatio algoritmin toiminnasta on saatavilla Euroopan rautatievirasto ERAn verkkosivuilta [29]. ETCS-algoritmiin perustuviin laskelmiin on tässä työssä käytetty ERAn kehittämää taulukkolaskentadokumenttia, joka suorittaa tarvittavat laskutoimitukset. Dokumentti on niin ikään saatavilla ERA:n verkkosivuilta [30].

Laskennassa lähdetään liikkeelle kullekin junalle ominaisesta hidastuvuusprofilista. Se on käytännössä askeleittain määritelty funktio, joka kuvaa junan ominaishidastuvuuden riippuvuutta hetkellisestä nopeudesta. Tässä otetaan huomioon esimerkiksi levyjarrujen kitkakertoimen muuttuminen sekä ilmanvastus. Esimerkki ominaishidastuvuusprofilista on esitetty kuvassa 16. Hidastuvuusprofiili määritellään eri tavalla niin kutsutuille gamma- ja lambdajunille. Gammajunalla tarkoitetaan moottorijunaa tai muuta junatyyppeä, jossa kokoonpanojen määrä on rajallinen ja ennalta tiedossa. Kokoonpanojen rajallisesta määrästä johtuen gammajunille ominaishidastuvuusprofiilit voidaan määrittää jo käyttöönoton yhteydessä. Tämän työn kannalta merkittävät gammajunat ovat moottorijunat Sm3 ja Sm6. Näille yksiköille on hidastuvuusprofiiliksi määritelty vakiohidastuvuus kaikilla nopeuksilla. [28] Yksiköiden ominaishidastuvuudet on esitelty JKV-menetelmän yhteydessä luvussa 5.1.2.

Lambdajunalla vastaavasti tarkoitetaan veturivetoista junaa, jonka kokoonpano voi vaihdella merkittävästi. Lambdajunille käytetään valmiiksi määriteltyjen hidastuvuusprofiilien sijaan muunnosmallia, jossa jokaisen junan ominaishidastuvuuden käyttäytyminen mallinnetaan erikseen jarrupainoprosentin funktiona. [28] Muunnosmalli on kuvailtu UIC:n määrelehden 544-1 [31] liitteessä G.



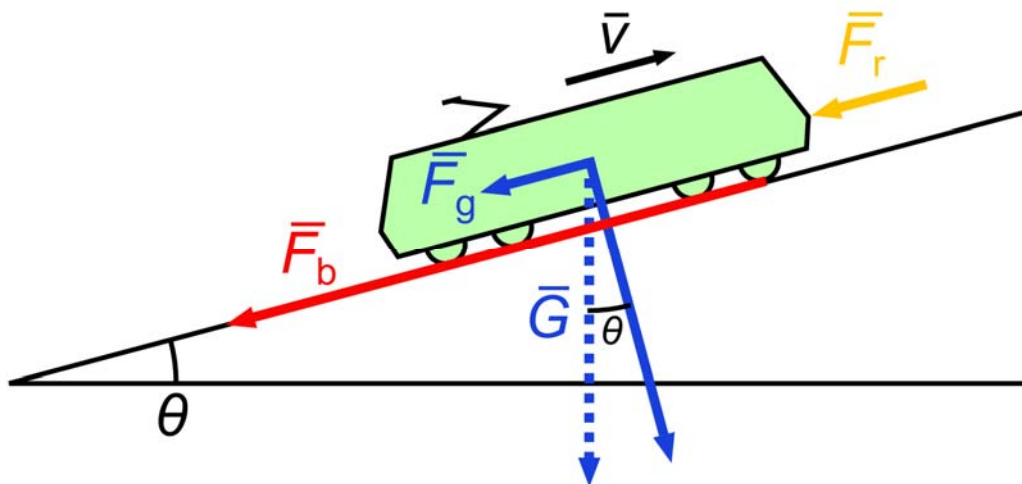
Kuva 16. Esimerkki ETCS-algoritmin käyttämästä junalle ominaisesta hidastuvuusprofilista hätäjarrutuksen tapauksessa. Kuva on otettu ETCS-laskelmiin tarkoitetusta taulukkolaskentadokumentista [30].

Junan ominaishidastuvuusprofiilin lisäksi otetaan huomioon pituuskaltevuuden sekä keliolosuhteiden aiheuttama paikasta riippuva radan hidastuvuusprofiili. Tämän työn laskennallisen osion puitteissa keliolosuhteilla ja radan pituuskaltevuudella on vakioarvo. ETCS-järjestelmä kuitenkin sallii moniportaisen pituuskaltevuusprofiilin syöttämisen järjestelmään siinä missä JKV-menetelmässä oletetaan vakiokaltevuus. Lisäksi ETCS-järjestelmä käsittelee keliolosuhteita dynaamisesti muuttuvana arvona siinä missä JKV-menetelmässä tietyllä jarrutusmatkalle määritetään vakiokeliolosuhteet. [28]

Kun junan ja radan ominaishidastuvuusprofiilit yhdistetään, saadaan nopeudesta ja paikasta riippuva hidastuvuusprofiili. Profiilia korjataan vielä kahdella kertoimella, $K_{v,int}$ ja $K_{r,int}$. $K_{v,int}$:n suuruus riippuu junan nopeudesta ja jarrulajista, kun taas $K_{r,int}$:n suuruus riippuu junan pituudesta. [28] Nämä ovat niin kutsuttuja kansallisia arvoja, jotka jokainen valtio voi säätää omille radoilleen, kalustolleen ja sääolosuhteilleen sopiviksi. Liikennevirasto on päättänyt, että Suomessa kertoimille asetetaan kiinteät arvot $K_{r,int} = 1$ ja $K_{v,int} = 0,95$. Junan nopeus, jarrulaji ja pituus eivät siis vaikuta kerrointen suuruuksiin Suomessa. [32]

5.1.4 Fysiikan kaavoihin perustuva menetelmä

Tässä menetelmässä johdetaan junan pysähtymismatka fysiikan peruskaavojen avulla Newtonin II lakiin $\sum F = ma$ perustuen. Junaan vaikuttavista voimista huomioidaan junan tuottama jarrutusvoima ja gravitaation aiheuttama voima kaltevilla radalla. Näitä voimia on havainnollistettu kuvassa 17. Menetelmässä ei oteta kantaa erilaisiin vastusvoimiin, joita junassa esiintyy. Näihin lukeutuu muun muassa laakerien sisäinen kitka, vierimisvastus sekä ilmanvastus. Kitkaa ja vierimisvastusta ei huomioida niiden pienuuden vuoksi. Ilmanvastus sen sijaan jätetään pois puhtaasti laskennan helpottamiseksi. Ilmanvastusvoima on riippuvainen hetkellisen nopeuden neliöstä ja sen huomioon ottaminen tekisi mallista differentiaaliyhtälön, jota olisi erittäin vaikea ratkaista analyttisesti. Tässä pyritään saamaan aikaan analyttisesti ratkaistavissa oleva menetelmä pysähtymismatkan laskemiseksi. Vastusvoimien puuttuminen ei kuitenkaan varsinaisesti vaaranna laskelmien turvallisuutta. Erilaisten vastusvoimien vuoksi todellinen pysähtymismatka on hieman laskettua lyhyempi.



Kuva 17. Junan vapaakappalekuvio fysiikallaisessa mallissa sekä luvussa 5.1.5 esiteltävässä simulaatiomallissa. Junavastusvoimaa F_r ei oteta huomioon fysiikallaisessa mallissa, kun taas simulaatiomallissa se huomioidaan.

Ensimmäisenä täytyy ottaa huomioon, että junan staattinen ja dynaaminen massa (m_{st} ja m_{dyn}) eroavat toisistaan. Staattinen massa on junan kokonaismassa sellaisenaan, kun taas dynaamisessa massassa on otettu huomioon junan pyörivien osien (pyörät, akselit, moottorin osat) aiheuttama hitaus. Siksi aina pätee $m_{st} < m_{dyn}$. Muunnettaessa voimaa kiihtyvyydeksi NII:n mukaan tarvitaan nimenomaan dynaaminen massa, sillä pyörivien massojen hitaus vaikuttaa kiihtyvyyden suuruuteen. Junan dynaamista massaa ei aina välttämättä tiedetä, vaan tiedossa voi olla ainoastaan staattinen massa sekä jarrupainoprosentti λ , joka sisältää tiedon massan suhteesta maksimaaliseen jarrutusvoimaan. Siksi dynaamisen ja staattisen massan suhdetta kuvataan usein kertoimella ρ_T , joka määritellään

$$\rho_T = \frac{m_{dyn}}{m_{st}} \quad (14)$$

ρ_T :n arvo voidaan arvioida tuntematta junayksiköiden todellisia pyöriviä massoja. Vetureille voidaan käyttää arvoa $\rho_L = 1,15$ ja matkustajavaunuille $\rho_C = 1,04$. Koko junan kerroin saadaan tällöin kaavalla 15. [33] Moottorijunayksiköille ρ_T :n arvoa on vaikeampi määrittellä samalla tavalla yleispätevästi. Tässä työssä moottorijunien dynaamisen ja staattisen massan suhteeksi oletetaan 1,07 sillä perusteella, että yleisimmin käytössä oleville junakokoonpanoille saadaan kaavalla 15 samankaltaisia tuloksia.

$$\rho_T = \frac{1,15 \sum m_{st,L} + 1,04 \sum m_{st,C}}{m_{st}} = 0,11 \frac{\sum m_{st,L}}{m_{st}} + 1,04 \quad (15)$$

missä $m_{st,L}$ on yksittäisen veturin staattinen massa [t]
 $m_{st,C}$ on yksittäisen matkustajavaunun staattinen massa [t].

Seuraavaksi lasketaan junaan vaikuttava vakiohidastuvuus b_g , joka aiheutuu kaltevilla radalla junaan vaikuttavasta painovoimasta. Tämän voiman suuruus on

$$F_g = m_{st} g \sin \theta \quad (16)$$

missä θ on radan pinnan ja vaakatason välinen kulma [rad].

Radan pinnan ja vaakatason välinen kulma θ saadaan radan pituuskaltevuudesta yhteyden $i/1000 = \tan \theta$ mukaisesti [34]. Tällöin $\sin \theta = \sin(\tan^{-1}(i/1000))$. Rautateillä käytettävät pituuskaltevuudet ovat kuitenkin hyvin pieniä. Suurin sallittu pituuskaltevuus matkustajaliikenneradalla on 15 ‰ [35], joka vastaa noin $0,86^\circ$ kulmaa vaakatasoon nähden. Tällä maksimiarvollakin yksinkertaistuksen $\sin \theta \approx i/1000$ käyttäminen tuottaa vain noin 0,01 % suuruisen virheen. Yksinkertaistusta voidaan siis luotettavasti käyttää. Voiman F_g suuruus on

$$F_g = \frac{m_{st} g i}{1000} \quad (17)$$

Voiman F_g junaan aiheuttama hidastuvuus b_g on yhtälöiden 14 ja 17 sekä NII:n mukaan

$$b_g = \frac{F_g}{m_{dyn}} = \frac{m_{st}gi}{1000m_{dyn}} = \frac{gi}{1000\rho_T} \quad (18)$$

Seuraavaksi lasketaan junan jarrujen aiheuttama maksimaalinen hidastuvuus $b_{b,max}$. UIC:n määrelehdessä 544-1 [31] on esitetty relaatio

$$B = 1,18F_{b,max} \quad (19)$$

missä B on junan jarrupaino [kg]

$F_{b,max}$ on suurin jarrutusvoima, jonka juna kykenee tuottamaan [N].

Tämä relaatio on nimenomaisesti tarkoitettu R-jarrulajia käyttävän levyjarrullisen matkustajajunakaluston jarrupainon arviointiin. Koska kaikki tässä työssä käsiteltävät junakokoonpanot täyttävät nämä ehdot, relaatiota voidaan käyttää suhteellisen luotettavasti toiseenkin suuntaan. Tällöin saadaan junan jarrupainosta junan suurin jarrutusvoima:

$$F_{b,max} = \frac{B}{1,18} \quad (20)$$

Sijoitetaan yhtälöön 20 jarrupainoprosentin määritelmä $\lambda = B/m_{st} \cdot 100$, jotta saadaan yhtälöön jarrupainon sijasta jarrupainoprosentti.

$$F_{b,max} = \frac{\lambda m_{st}}{118} \quad (21)$$

Yhtälöiden 14 ja 21 sekä NII:n mukaan saadaan maksimaalinen jarrujen tuottama hidastuvuus

$$b_{b,max} = \frac{F_{b,max}}{m_{dyn}} = \frac{\lambda m_{st}}{118m_{dyn}} = \frac{\lambda}{118\rho_T} \quad (22)$$

Junan maksimaalista hidastuvuutta laskettaessa täytyy ottaa huomioon myös kiskon ja pyörän välinen kitkakerroin α . Mikäli jarrutusvoima kasvaa liian suureksi, on seurauksena jarrujen lukkiutuminen. Suurin jarrutusvoima, jonka juna voi pyörien kautta kiskoihin siirtää, on

$$F_{b,lim} = \alpha m_{st}g \quad (23)$$

Suurin sallittava jarrujen tuottama hidastuvuus on kaavojen 14 ja 23 sekä NII:n perusteella

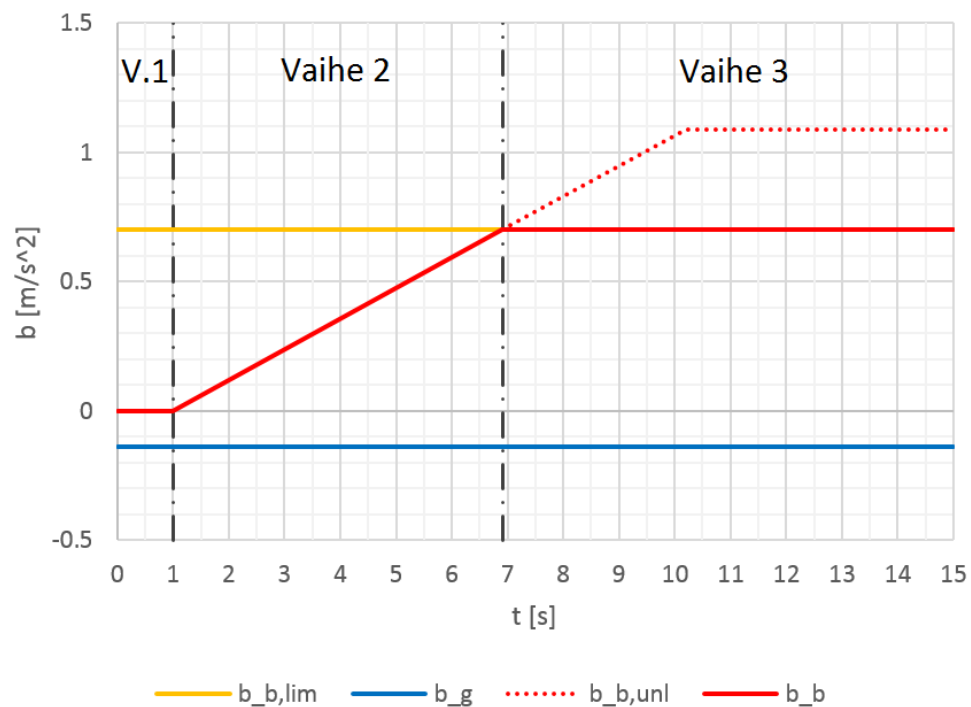
$$b_{b,lim} = \frac{F_{b,lim}}{m_{dyn}} = \frac{\alpha m_{st}g}{m_{dyn}} = \frac{\alpha g}{\rho_T} \quad (24)$$

Junan hidastuvuutta rajoittaa siis joko se, kuinka suuren kiihtyvyyden pyörän ja kiskon välinen kitkakerroin sallii tai se, kuinka suuren hidastuvuuden junan jarrut kykenevät tuottamaan. Näistä arvoista on siis aina valittava alhaisempi. Todellinen maksimi-hidastuvuus $b_{b,true}$ junalle on

$$b_{b,true} = \min(b_{b,max}, b_{b,lim}) \quad (25)$$

Kun hidastuvuudet $b_{b,true}$, $b_{b,lim}$, $b_{b,max}$ ja b_g on selvitetty, on aika tarkastella itse jarrutustapahtumaa. Tässä yhteydessä hidastuvuuden kehittymistä kuvataan mallilla, jossa on kolme vaihetta. Junan hidastuvuuksien kehittyminen on esitetty kuvassa 18. Jarrutustapahtuman vaiheet ovat:

1. Junan kulkuun vaikuttaa ainoastaan vakiohidastuvuus b_g . Tällä vaiheella mallinnetaan viivettä jarrutuskäskyn antamisen ja ensimmäisten jarrujen kiinnittymisen välillä. Vaiheen kesto on $t_s = 1$ s, joka perustuu JKV:n toimintaselosteessa [24] annetun järjestelmäviiveen arvoon.
2. Junan kulkuun vaikuttaa vakiohidastuvuus b_g . Lisäksi jarrujen tuottama hidastuvuus kasvaa lineaarisesti 0:sta $b_{b,true}$:een. Tällä vaiheella mallinnetaan jarrutusvoiman vähittäistä kasvamista. Vaiheen keston laskeminen kuvataan jäljempänä.
3. Junan kulkuun vaikuttaa vakiohidastuvuus $b_{b,true} + b_g$, kunnes juna on pysähtynyt.



Kuva 18. Junaan vaikuttavat hidastuvuudet fysikaalisessa mallissa.

Toisen vaiheen kesto määräytyy jarruvoiman kehittymisajan perusteella, joka tässä työssä lasketaan aiemmin esitellyn kaavan 9 mukaan. Olettaen, että junan jarrutusvoima kasvaa tässä ajassa maksimiarvoonsa $b_{b,max}$, jarrujen tuottaman hidastuvuuden kasvunopeus k on

$$k = \frac{b_{b,max}}{t_b} \quad (26)$$

missä t_b on jarruvoiman kehittymisaika [s].

Tämä arvo k on toisin sanoen kuvassa 18 esitetyn b_b -käyrän kulmakerroin 2. vaiheen aikana. Jarrujen tuottama hidastuvuus kasvaa toisen vaiheen aikana nopeudella k , kunnes se saavuttaa suurimman sallitun arvonsa $b_{b,true}$ ajan t_r kuluttua. Tämä aika on toisen vaiheen kesto, ja sen arvo on

$$t_r = \frac{b_{b,true}}{k} \quad (27)$$

Tästä seuraa luonnollisesti, että mikäli kiskon ja pyörän välinen kitka on riittävän suuri sallimaan suurimman junan tuottaman jarrutusvoiman välittämisen, niin $b_{b,true} = b_{b,max}$ ja $t_r = t_b$.

Kun tiedetään hidastuvuuksien lisäksi ajat t_s ja t_r , voidaan laskea kunkin vaiheen aikana kuljettu matka. Näiden matkojen summa on junan jarrutusmatka. Ensimmäisen vaiheen aikana junan kiihtyvyys on

$$a_1(t) = -b_g \quad (28)$$

jolloin nopeus ensimmäisen vaiheen lopussa on

$$v_1 = v_0 + \int_0^{t_s} -b_g dt = v_0 - b_g t_s \quad (29)$$

ja ensimmäisen vaiheen aikana kuljettu matka on

$$x_1 = \int_0^{t_s} v_0 - b_g t dt = v_0 t_s - \frac{1}{2} b_g t_s^2 \quad (30)$$

Toisessa vaiheessa kiihtyvyys ajan funktiona on

$$a_2(t) = -kt - b_g \quad (31)$$

jolloin nopeus toisen vaiheen lopussa on

$$v_2 = v_1 + \int_0^{t_r} -kt - b_g dt = v_1 - b_g t_r - \frac{1}{2} k t_r^2 \quad (32)$$

ja toisen vaiheen aikana kuljettu matka on

$$x_2 = \int_0^{t_r} v_1 - b_g t - \frac{1}{2} k t^2 dt = v_1 t_r - \frac{1}{2} b_g t_r^2 - \frac{1}{6} k t_r^3 \quad (33)$$

Kolmannessa vaiheessa junan nopeus pienenee vakiohidastuvuudella $b_{b,true} + b_g$ nopeudesta v_2 nopeuteen 0. Kolmannen vaiheen aikana kuljettu matka on

$$x_3 = \frac{v_2^2}{2(b_{b,true} + b_g)} \quad (34)$$

Lopulta junan jarrutusmatka s saadaan yhtälöiden 30, 33 ja 34 tulosten summana:

$$s = x_1 + x_2 + x_3 \quad (35)$$

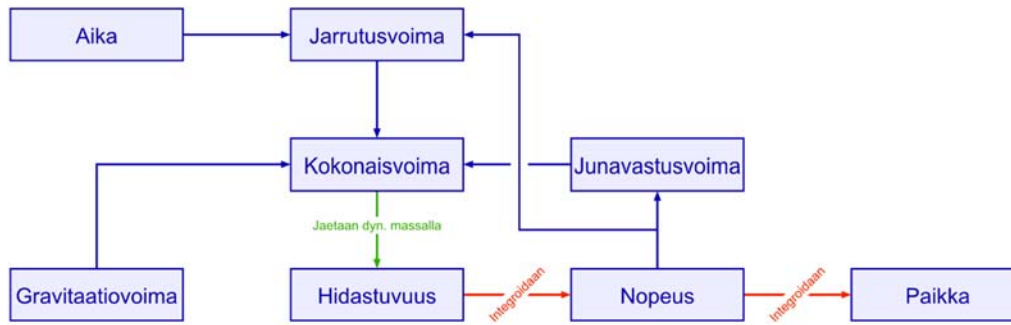
Yllä kuvaillun laskentamenetelmän käyttöä on havainnollistettu liitteessä A esimerkin avulla.

5.1.5 Simulaatiomalli

Osa junan jarrutustapahtumaan vaikuttavista ilmiöistä, kuten ilmanvastus ja levyjarrujen kitkakertoimen nopeusriippuvuus, ovat fysikaalisesti sellaisia, että niiden pohjalta muodostettujen yhtälöiden analyttinen ratkaiseminen olisi vaikeaa, kohtuuttoman työlästä ja joissain tapauksissa jopa mahdotonta. Edellä johdetussa fysikaalisessa mallissa nämä tekijät on jätetty huomiotta. Jotta saadaan tutkittua näiden tekijöiden vaikutusta kokonaiskuvaan, täytyy muodostaa simulaatiomalli, jonka avulla voidaan numeerisesti ratkaista monimutkaisia differentiaaliyhtälöitä. Tässä tapauksessa mallinnetaan yhtälö 36, joka perustuu Newtonin II lakiin. Yhtälössä otetaan huomioon jarrutusvoima, gravitaatiovoima sekä junavastusvoima. Näitä voimia on havainnollistettu aiemmin kuvassa 17.

$$\ddot{x}(t) = -\frac{1}{m_{dyn}} \left(F_b(t, \dot{x}(t)) + \left(F_r(t, \dot{x}(t)) \right) + F_g \right) \quad (36)$$

Differentiaaliyhtälön ratkaisemiseen käytettiin MATLAB/Simulink-ohjelmistoa. Yhtälön toteuttavan Simulink-mallin periaatteellinen lohkokaavio on esitetty kuvassa 19. Tarkemmat kuvat simulaatiomallista on esitetty liitteessä B.



Kuva 19. Työssä käytetyn Simulink-mallin periaatteellinen lohkokaavio.

Yhtälön 36 mukaisesti mallissa lasketaan junaan vaikuttavien voimien summa. Voimien summa jaetaan junan dynaamisella massalla, jotta saadaan junan hetkellinen hidastuvuus. Hidastuvuus integroidaan, mikä antaa junan hetkellisen nopeuden. Nopeus viedään toisen integraattorin läpi, jotta saadaan junan hetkellinen paikka lähtöaseman suhteen. Nopeus myös takaisinkytketään jarrutusvoiman ja junavastusvoiman laskemista varten. Mallista tallennetaan jokaisella iteraatiolla muuttujien arvot vektoreihin. Junan nopeutta valvotaan Compare To Zero -lohkolla, joka pysäyttää simulaation, kun $v(t) \leq 0$. Tällöin junan pysähtymismatka saadaan simulaation loputtua junan paikan sisältävän vektorin viimeisen alkion arvosta. Simulaation aika-askelena käytettiin 5 ms, ja ohjelman annettiin automaattisesti valita tilanteeseen sopivin ratkaisualgoritmi. Simulaation automatisointiin käytetty MATLAB-skripti on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä B.

Mallissa jarrutusvoiman arvioidaan riippuvan kuluneesta ajasta sekä hetkellisestä nopeudesta kaavan 37 mukaisesti [36]. Kaavan avulla saavutetaan malli, jossa jarrutusvoima kasvaa aluksi nopeasti mutta lähestyy lopulta asymptoottisesti maksimijarrutusvoimaa. Tällainen käyttäytyminen simuloi paremmin painealtojen propagaationopeudesta aiheutuvaa hitautta kuin fysiikan kaavoista johdetussa menetelmässä käytetty lineaariapproksimaatio. Lisäksi jarrutusvoimaa myöhästetään parametrin t_s verran, mikä kuvaa järjestelmän viivettä. Tämä käsittää jarrutuskäskyn prosessointiin kuluvaan ajan, jarrutusjärjestelmän venttiileiden hitauden sekä muut tekniset viiveet. Parametrin arvoksi on JKV:n laskukaavojen nojalla asetettu 1 s. Kaavan parametri t_b on jarrutusvoiman kehittymisaika, joka lasketaan samalla tavoin kuin JKV-menetelmän yhteydessä, kaavalla 9. Tässä yhteydessä sitä käytetään aikana, jonka kuluessa jarrutusvoima nousee noin 95 %:iin $(1-e^{-3})$ maksimiarvostaan. Maksimiarvon $F_{b,max}$ laskemiseen käytetään fysikaalisen mallin yhteydessä määriteltyä kaavaa 20.

$$F_b(t, v(t)) = \begin{cases} 0, & t < t_s \\ k_\mu \left(v(t) F_{b,max} (1 - e^{-3(t-t_s)/t_b}) \right), & t \geq t_s \end{cases} \quad (37)$$

missä t on kulunut aika jarrutustapahtuman alkamisesta [s]
 t_s on järjestelmäviive [s]
 k_μ on levyjarrujen kitkakertoimen nopeusriippuvuutta kuvaava kerroin [-]
 $F_{b,max}$ on jarrujen tuottama maksimaalinen jarrutusvoima [N]
 t_b on jarrutusvoiman kehittymisaika [s].

Kaavan 37 kertoimen k_μ suuruudeksi on arvioitu

$$k_\mu(v(t)) = \begin{cases} 1, & v(t) \leq 150 \\ 1,165 - 0,0011v(t), & v(t) > 150 \end{cases} \quad (38)$$

Kaava 38 on lineaarinen interpolaatio JKV:n jarrukäyrälaskennassa käytetyn parametrin k_v arvoista, joita käytetään nimenomaan levyjarrujen kitkakertoimen nopeusriippuvuuden huomioon ottamiseen. Tätä kaavaa käytetään tässä työssä, sillä se on ainoa approksimaatio junien levyjarrujen kitkakertoimen nopeusriippuvuudelle, joka työn yhteydessä onnistuttiin löytämään. On huomioitavaa, että nopeus on syötettävä kaavaan kilometreinä tunnissa. JKV:n laskentamenetelmässä käytetyt arvot, joiden perusteella yhtälö 38 on laadittu, on esitelty aiemmin taulukossa 5.

Junavastusvoima F_r käsittää kaikki junaan vaikuttavat voimat, jotka eivät johdu junan jarruista eivätkä painovoimasta. Junavastusvoiman arvioimiseen on käytetty monia erilaisia keinoja, ja esimerkiksi Rochardin ja Schmidin artikkelissa [37] esitellään näitä menetelmiä. Artikkelissa esitellyistä menetelmistä päädyttiin käyttämään Ranskan valtiollisen rautatieoperaattorin SNCF:n kehittämää menetelmää, sillä siihen tarvittavat parametrit vastaavat parhaiten muissa laskentamenetelmissä käytettyjä parametreja. Seuraavaksi esitettävissä kaavoissa on joitakin muuttujien symboleita vaihdettu lähteessä käytetyistä symboleista, jotta ne olisivat linjassa tämän työn muissa osioissa käytettyjen symbolien kanssa.

Valtaosa junavastusvoiman malleista, kuten myös SNCF:n malli, määrittelee junavastusvoiman junan hetkellisestä nopeudesta riippuvana toisen asteen polynomina

$$F_r(v(t)) = k_A + k_B v(t) + k_C (v(t))^2 \quad (39)$$

missä F_r on junavastusvoima [kN]
 k_A , k_B ja k_C ovat vakioparametreja
 $v(t)$ on junan hetkellinen nopeus [m/s].

Parametrien k_A , k_B ja k_C määrittelyssä taas on suuria eroja eri mallien välillä. SNCF:n mallin mukaan vakiotermi k_A on

$$k_A = \frac{\gamma}{1000} \sqrt{m_{st} n_{ax}} \quad (40)$$

missä γ on kalustotyyppistä riippuva kerroin [-]
 m_{st} on junan staattinen massa [kg]
 n_{ax} on junan akseliluku [-].

Kaavan 40 kerroin γ saa arvoja väliltä 0,9...1,5. Alhaisempia arvoja käytetään modernille henkilöliikennekalustolle ja korkeampia arvoja epähomogeenisille tavarajunille. Tässä työssä kertoimen arvoksi on oletettu 1 sillä perusteella, että työssä käsitellään ainoastaan suhteellisen modernia henkilöliikennekalustoa.

Lineaarisen termin kerroin k_B on

$$k_B = (3,6 \cdot 10^{-7})m_{st} \quad (41)$$

Neliöllisen termin kerroin k_C on

$$k_C = 0,1296(k_1 A_{\perp} + k_2 pL) \quad (42)$$

missä A_{\perp} on junan kulkusuuntaa vastaan kohtisuora pinta-ala [m²]
 p on junan ympärysmitta [m]
 L on junan pituus [m].

Kaavan 42 kerroin k_1 kuvaa junan keulan ja perän virtaviivaisuutta. Kertoimen arvo vaihtelee välillä $(9...20) \cdot 10^{-4}$ siten, että virtaviivaiselle suurnopeusjunalle kerroin on $9 \cdot 10^{-4}$ ja perinteisemmälle junalle $20 \cdot 10^{-4}$. Tässä työssä käytetään arvoja $k_1 = 10 \cdot 10^{-4}$ Sm3- ja Sm6-junille ja $k_1 = 20 \cdot 10^{-4}$ muille junille.

Kaavan 42 kerroin k_2 kuvaa junan ulkopinnan kuntoa. Kertoimen arvo vaihtelee välillä $(20...30) \cdot 10^{-6}$. Koska tarkempaa tietämystä kaluston pinnanlaadun vaikutuksesta kertoimen suuruuteen ei ole saatavilla, tässä työssä käytetään kaikille junille arvoa $k_2 = 25 \cdot 10^{-6}$.

Junan kulkusuuntaa vastaan kohtisuoran pinta-alan A_{\perp} arvo tässä työssä lasketaan suurimman kalustoyksikön mukaan. Junassa, jossa on kaksikerrosvaunuja, pinta-ala on laskettu ohjausvaunu Edo:n päätyprofilin mukaan, ja sen suuruudeksi on arvioitu 14,5 m². Kaikilla tällä hetkellä käytössä olevilla kaksikerroksisilla vaunuilla on sama päätyprofiili, joten tätä arvoa voi käyttää mihin tahansa junaan, jossa on yksikin kaksikerrosvaunu. Kokonaan yksikerroksisesta kalustosta koostuvan junan päätypinta-ala on taas arvioitu Sr2-veturin päätypinta-alan mukaan, joka on noin 11,5 m².

Junan ympärysmitta p on arvioitu niin ikään Edo:n ja Sr2:n päätyprofileista. SNCF:n junavastuksen arviointimenetelmää varten ympärysmitta tulee määritellä siten, että siihen ei lasketa mukaan junan alapintaa. Näin ollen tässä työssä $p = 12,0$ m junalle, jossa on kaksikerrosvaunuja ja $p = 10,5$ m junalle, joka koostuu kokonaan yksikerroksisesta kalustosta.

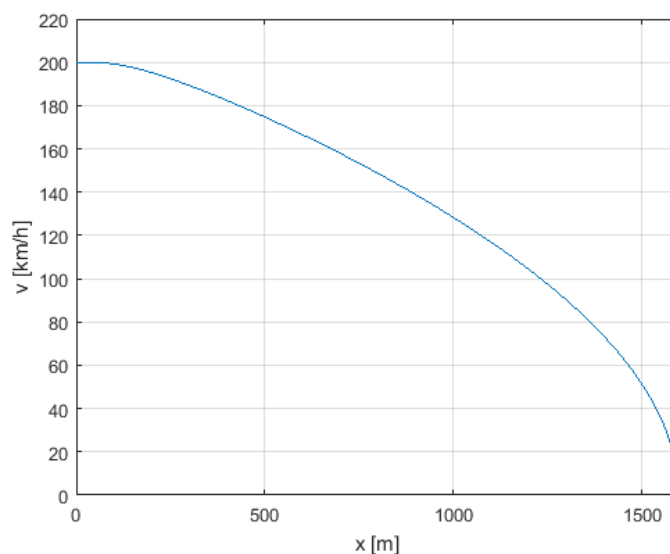
Kun kertoimien k_A , k_B ja k_C arvot on määritetty, voidaan ne sijoittaa kaavaan 39 junavastuksen laskemiseksi nopeuden funktiona. On huomattavaa, että tällä kaavalla saatava junavastusvoima on ilmaistu kilonewtoneina. Täten simulaatiomallissa tulos kerrotaan 1000:lla ennen käyttöä.

Differentiaaliyhtälön 36 voima F_g on painovoiman junaan aiheuttama voima, jonka suuruus riippuu radan kallistuksesta. Voiman suuruus on luvussa 5.1.4 esitetyn perustein

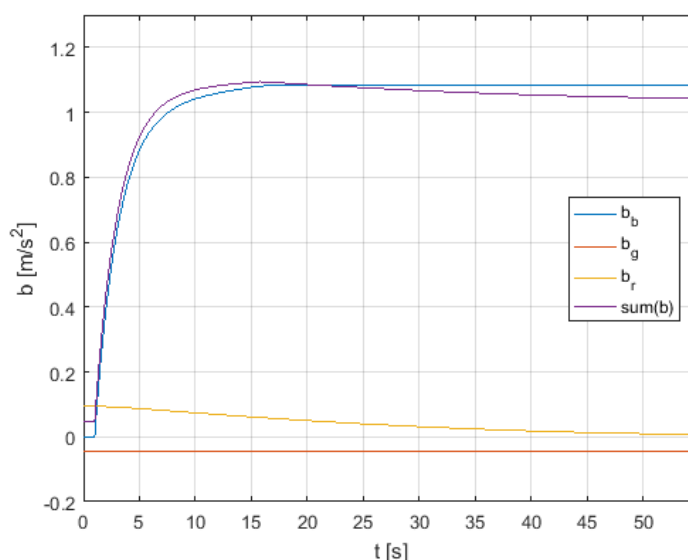
$$F_g = m_{st}g \sin\left(\tan^{-1}\frac{i}{1000}\right) \quad (43)$$

missä i on radan pituuskaltevuus [%o].

Eräs simulaatiomallin eduista on, että pituuskaltevuus voidaan asettaa riippumaan hetkellisestä paikasta siten, että $i = i(x(t))$. Tällöin voitaisiin syöttää mallille opastinvälin tarkka korkeusprofiili, ja kaltevuusvoimat saataisiin realistisemmiksi. Tässä työssä kuitenkin oletetaan vakiokaltevuus opastinvälin matkalla, sillä työssä keskitytään tutkimaan huonointa mahdollista tilannetta, jossa lasku on jyrkin mahdollinen koko jarrutusmatkalla. Esimerkkinä simulaation tuloksista kuvissa 20 ja 21 on esitetty kuusivaunuisen IC-junan (kokoonpano $Sr2 + Ed + Ed + Edfs + ERd + Edb + Edo$) jarrutustapahtuma lähtönopeudesta 200 km/h. Junan jarrupainoprosentti on 135. Tässä esimerkksimulaatiossa radan pituuskaltevuudeksi on asetettu -5‰ , kitkaolosuhteet on oletettu ideaalisiksi ja junan jarrut täysin toimiviksi.



Kuva 20. Simulaatiomallin avulla laskettu junan nopeus paikan funktiona.



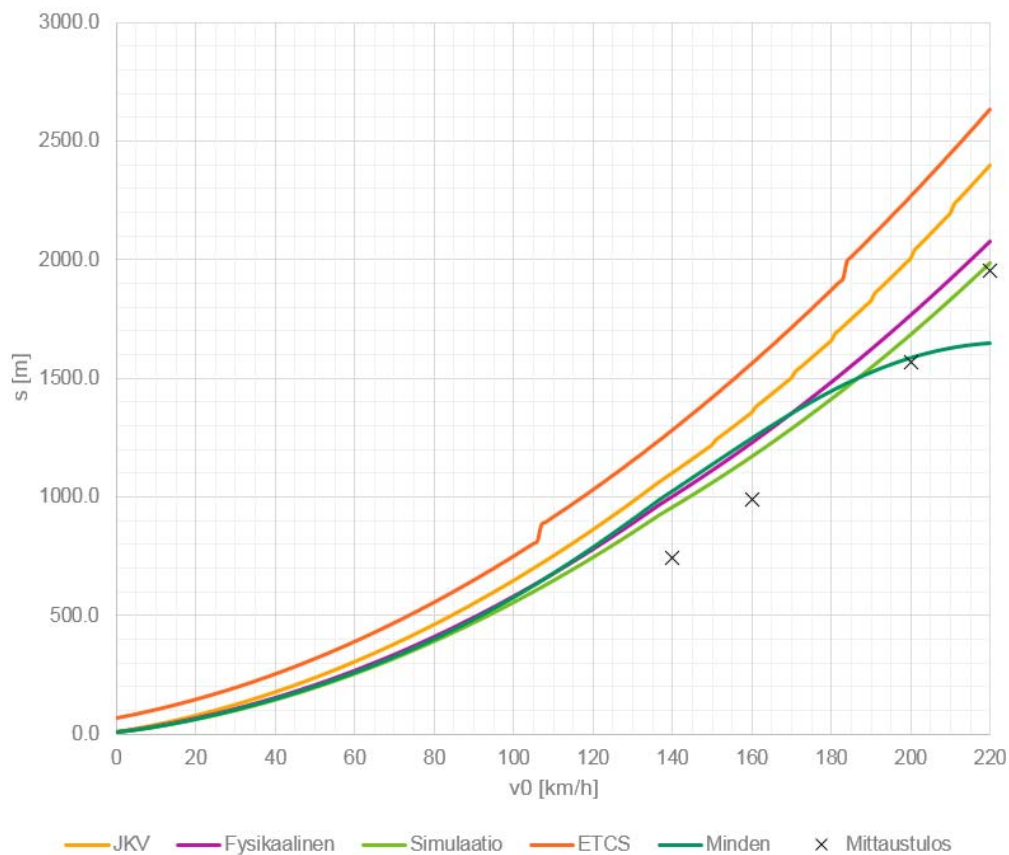
Kuva 21. Simulaatiomallin avulla lasketut junaan vaikuttavat hidastuvuudet ajan funktiona.

Mallin avulla saadaan junan jarrutusmatkaksi esimerkkitilanteessa 1596 m. Kuvasta 21 nähdään, että junavastusvoiman aiheuttama hidastuvuus b_r on itse asiassa hyvinkin merkittävä. Jarrutukseen kuluvan ajan ensimmäisellä kolmanneksella se vaikuttaa junaan jopa voimakkaammin kuin painovoiman aiheuttama hidastuvuus b_g .

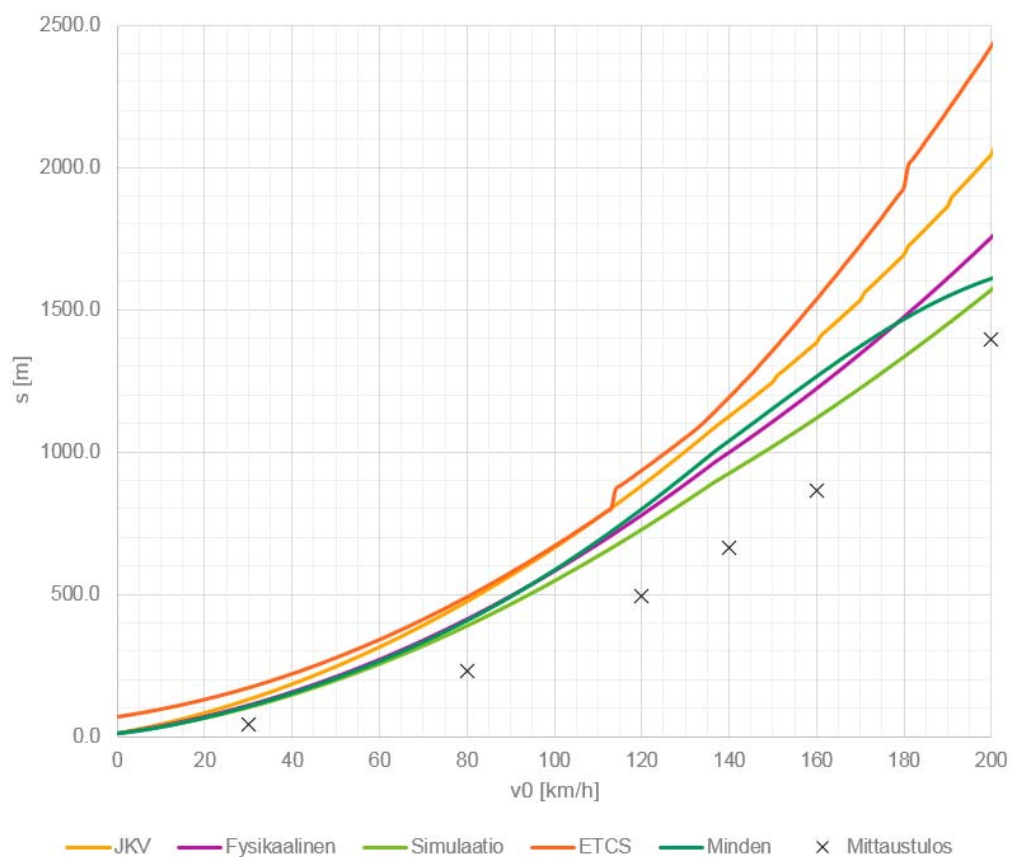
5.2 Laskentamenetelmien vertailu

Kuvissa 22 ja 23 on vertailtu edellä esiteltyjen laskentamenetelmien tuloksia. Kuvissa on esitetty kunkin menetelmän käyttöjarrutuksen aloituskäyrän etäisyys tavoitepisteestä nopeuden funktiona. JKV-menetelmän yhteydessä tämä tarkoittaa C-käyrän etäisyyttä ja ETCS-menetelmän yhteydessä SBI-käyrän etäisyyttä. Jotta fysikaalisen mallin, simulaatiomallin ja Mindenin kaavan avulla saaduista jarrutusmatkoista on saatu vertailukelpoisia kulunvalvontajärjestelmien antamien tulosten kanssa, on niiden jarrutusmatkoihin lisätty JKV-menetelmän turvamarginaali s_0 , joka on laskettu kaavan 10 avulla.

Kuvan 22 tilanne vastaa yhden yksikön kokoisen Sm3-junan jarrutusta ideaalisissa kitkaolosuhteissa ja tasaisella radalla. Kuvan 23 tilanne puolestaan kuvaa yksittäisen Edo-vaunun jarrutusta vastaavanlaisessa ympäristössä. Nämä kaksi skenaariota on valittu tarkasteltavaksi sillä perusteella, että todellisen maailman jarrutuskokeiden tulokset olivat saatavilla näille skenaarioille. Näiden jarrutuskokeiden tulokset on niin ikään esitetty kuvissa 22 ja 23.



Kuva 22. Sm3-yksikön jarrutusmatkat lähtönopeuden funktiona, kun junan kaikki jarrut ovat toiminnassa, kitkaolosuhteet ovat optimaaliset ja radan pituuskaltevuus on 0. Jarrutusmatkat on laskettu kaikilla työssä esitellyillä menetelmillä. Vertailukohdan antamiseksi kuvassa on esitetty myös VR:n suorittamien todellisten jarrutuskokeiden mittaustuloksia.



Kuva 23. Yksittäisen Edo-vaunun jarrutusmatkat lähtönopeuden funktiona, kun junan kaikki jarrut ovat toiminnassa, kitkaolosuhteet ovat optimaaliset ja radan pituuskaltevuus on 0. Jarrutusmatkat on laskettu kaikilla työssä esitellyillä menetelmillä. Vertailukohdan antamiseksi kuvassa on esitetty myös VR:n suorittamien todellisten jarrutuskokeiden mittaustuloksia.

Kuvista 22 ja 23 nähdään selvästi, että Mindenin kaava käyttäytyy epä johdonmukaisesti yli 160 km/h nopeuksilla. Syy tähän on todennäköisesti se, että Mindenin kaava on alun perin tarkoitettu käytettäväksi ainoastaan 160 km/h nopeuteen saakka. Kaavassa käytettyjen kertoimien ψ , c_1 ja c_2 arvot ovat olleet taulukoituina käyttöä varten. Luvussa 5.1.1 esitellyt kaavat näille kertoimille ovat mitä ilmeisimmin myöhemmin laadittuja polynomiapproksimaatioita alkuperäisille taulukoiduille arvoille. Näiden approksimaatioiden ekstrapolointi alkuperäisten taulukoiden nopeusalueen ulkopuolelle ei tässä tapauksessa tuota realistisia tuloksia. Lisäksi Mindenin kaavassa ei ole sisäänrakennettua mahdollisuutta ottaa huomioon heikentyneitä kitkaolosuhteita. Jotta tämä ilmiö saataisiin huomioitua kaavassa, täytyisi kaavaa muokata. Tämä puolestaan aiheuttaisi kohtuuttoman määrän epävarmuutta kaavan käyttöön. Näistä syistä Mindenin kaavaa ei tämän työn yhteydessä enää jäljempänä oteta huomioon.

Muissakin laskentamenetelmissä on huomattavia eroja. Kuvista päätellen ETCS-menetelmä antaa kaikkein pessimistisimmät arviot jarrutusmatkasta, ja optimistisimmat arviot antaa simulaatiomalli. Kuvan 22 tapauksessa suurin ero näiden kahden menetelmän antamien tulosten välillä on noin 650 m. Tämä ero on erittäin merkittävä. Myös JKV-menetelmän antamat arvot ovat suhteellisen korkeita verrattuna fysikaaliseen mallin sekä simulaatiomalliin. Tässä työssä johdettujen mallien keskinäinen ero ei ole järin suuri.

Kaikkein merkittävin seikka kuvissa 22 ja 23 on kuitenkin, että kaikkien laskentamenetelmien perusteella käyttöjarrutus aloitettaisiin huomattavasti aikaisemmin, kuin mitä junan todellisen jarrutuskyvyn puolesta olisi tarve. Tästä voidaan päätellä, että laskennassa käytetyissä arvoissa on jo valmiiksi jonkin verran turvavaraa. VR:n Edo-vaunulle suorittamista jarrutuskokeista käy ilmi, että kokeissa tulokseksi saatujen jarrutusmatkojen perusteella Edo:n jarrupainoksi olisi voitu R-jarrulajilla määritellä jopa 96 t. Edo:n jarrupainoksi on kuitenkin määritetty 90 t. Mikäli kaikkien junakalustoyksiköiden jarrupainon määrittelyssä on tehty vastaavanlaista ylimitoitusta, niin tämä antaa luotettavuutta sille, että mitä tahansa työssä käsiteltyä laskentamenetelmää voisi käyttää uusien jarrutuskykyvaatimusten arvojen määrittelyyn.

6 Päivitettyjen vaatimusten määrittely

Tässä luvussa lasketaan ehdotukset uusiksi jarrupainoprosentin vaadituiksi arvoiksi luvussa 5 esiteltyjen menetelmien perusteella. Ensin määritellään työssä huomioon otettavat junakokoonpanot. Tähän keskittyy luku 6.1. Tämän jälkeen luvussa 6.2 määritellään ja perustellaan laskennassa käytettävien vakioiden arvot, tehdyt oletukset ja tunnetut rajoitukset. Luvussa 6.3 lasketaan kullakin menetelmällä vaaditut jarrupainoprosentin arvot.

6.1 Käsiteltävät junakokoonpanot

Jarrutuskykyvaatimukset kootaan tämän työn lopussa yhdeksi taulukoksi, jossa eri junakokoonpanoja ei ole eritelty. Tästä syystä ei ole mielekäästä laskea jarrupainoprosentteja kaikille käytössä oleville junakokoonpanoille erikseen. Kun jarrupainoprosenttivaatimukset lasketaan kaikkein vaativimmille junakokoonpanoille, ne ovat turvalliset myös muille kokoonpanoille. Tästä syystä jarrutuskykyvaatimukset on kullakin menetelmällä laadittu rajoittavimman junakokoonpanon mukaan. Tärkeimmät pysähtymismatkaan vaikuttavat parametrit ovat lähtönopeus, junan tuottama jarrutusvoima, massa, jarrutusvoiman nousuaika, radan kaltevuus sekä jarrutusvoimaa rajoittava kitkakerroin kiskon ja pyörän välillä. Jarrupainoprosentti sisältää tiedon junan jarrutusvoimasta ja massasta. Jarrutusmatkat lasketaan jarrupainoprosentin ja lähtönopeuden funktiona. Koska ympäristön olosuhteet on vakioitu, radan kaltevuus ja kitkakerroin ovat vakioita. Ainoaksi laskentaa määrittäväksi parametriksi jää jarruvoiman nousuaika, joka on joko suoraan verrannollinen junan pituuteen kaavan g mukaan tai moottorijunien tapauksessa vakio. Pidempi jarruvoiman nousuaika tarkoittaa pidempää jarrutusmatkaa luvussa 5 esiteltyjen menetelmien perusteella. Siksi työssä käsiteltäviksi kokoonpanoiksi on valittu pisimmät junakokoonpanot, joita matkustajaliikenteessä Suomessa käytetään. Nämä kolme työssä käsiteltävää kokoonpanoa on esitelty taulukossa 6. Seuraavissa kappaleissa kuvaillaan lyhyesti kunkin kokoonpanon ominaisuudet.

Taulukko 6. Työssä käsiteltävät junakokoonpanot, niiden sisältämät kalustoyksiköt, rakenteelliset huippunopeudet, pituudet sekä staattiset massat [38].

Nimi	Kokoonpano	Sn	Pituus	Massa
Intercity	$Sr2 + 8 \times Ed + 3 \times Edb + 2 \times Edfs + 2 \times ERd$	200 km/h	416,5 m	1021 t
Allegro	$2 \times Sm6$	220 km/h	369,6 m	934 t
Tolstoi	$2 + 15 \times 61-4186 + 61-4460$	160 km/h	411,0 m	1124 t

Suurin osa Suomessa liikennöivistä kaukoliikenteen matkustajajunista on veturivetoisia InterCity-junia (IC). Junien vaunustot koostuvat joko yksi- tai kaksikerroksisista matkustajavaunuista tai näiden yhdistelmästä. Vanhempien yksikerroksisten IC-vaunujen käyttö on kuitenkin vähentymässä, ja yhä suurempi osa IC-junista koostuu nykyään veturin lisäksi ainoastaan kaksikerroksisista matkustajavaunuista. Siksi tähän työhön on valittu tarkasteltavaksi pisin mahdollinen kokonaan kaksikerroksisista IC-vaunuista koostuva juna. Käsitelty 15-vaunuinen kokoonpano on harvinainen ja sitä tavallisesti käytetään vain suurien juhlapyhien meno- ja paluuliikenteen ruuhkissa. Juna koostuu $Sr2$ -sähköveturista, Ed -vaunuista (kaksikerroksinen matkustajavaunu),

Edb-vaunuista (kaksikerroksinen matkustajavaunu Ekstra-luokan osastolla), Edfs-vaunuista (kaksikerroksinen matkustajavaunu lisäpalveluilla ja konduktöörinhytillä) sekä ERd-vaunuista (kaksikerroksinen matkustaja- ja ravintolavaunu). Näiden vaunun rakenteellinen huippunopeus on 200 km/h, mikä on myös junakokoonpanon suurin sallittu nopeus. Jarrupainoprosentin vaaditut arvot lähtönopeuksille 200 km/h saakka on laskettu tämän kokoonpanon mukaan.

Koska IC-kokoonpano on pidempi kuin Tolstoi, niin pääsääntöisesti IC-junalla saadaan pidemmät jarrutusmatkat kuin Tolstoilla. Simulaatiomallin yhteydessä kuitenkin havaittiin, että Tolstoin jarrutusmatkat ovat aavistuksen pidempiä kuin IC:n. Tämä johtuu ilmanvastuksen huomioon ottamisesta. Tolstoissa ei ole kaksikerrosvaunuja, joten sen päätypinta-ala on pienempi kuin IC:n ja näin ollen myös ilmanvastusvoima on pienempi. Tästä syystä simulaatiomallin yhteydessä vaadittu jarrupainoprosentti nopeuteen 160 km/h saakka on laskettu Tolstoin mukaan. Muissa laskentamenetelmissä näin ei ollut tarvetta tehdä.

Tolstoi-kokoonpano on tässä työssä käsiteltävistä junakokoonpanoista vaikein määrittellä tarkasti. Kyseessä on päivittäinen Helsingin ja Moskovan välillä liikennöivä yöpikajuna, jonka kokoonpano vaihtelee huomattavasti ja usein. Junan vaunuina käytetään Venäjän rautatieyhtiö RŽD:n kalustoa, mutta Suomen valtion rataverkolla Vainikkalan raja-asemaa lukuun ottamatta junaa vetää suomalainen veturi. Junissa on tyypillisesti kahden eri aikakauden vaunuja. Uudemmat vaunut ovat vuoden 2008 jälkeen valmistettuja nykyaikaisia vaunuja, joissa on levyjarrut ja joista osan rakenteellinen huippunopeus on jopa 200 km/h. Vanhemmissa vaunuissa on tönkkäjarrut ja olennaisesti alhaisempi jarrupainoprosentti kuin uudemmissa vaunuissa, ja niiden rakenteellinen huippunopeus on 160 km/h. VR on jarrutuskokeissaan todennut, että pelkästään vanhoista vaunuista koostuvan Tolstoi-junan jarrupainoprosentti on noin 90. Jotta saadaan tutkittua huonoin mahdollinen tapaus, tässä työssä junassa oletetaan olevan pelkästään vanhanmallisia vaunuja. Vaunuja oletetaan olevan yhteensä 16 kappaletta, jolloin junapituus on lähinnä edellä mainitun IC-kokoonpanon pituutta. Vaunujen tyyppimerkinnät ovat 61-4186 (makuuvaunu) ja 61-4460 (ravintolavaunu). [38]

Allegro- eli Sm6-juna on Helsingin ja Pietarin välisessä kansainvälisessä liikenteessä käytettävä sähkömoottorijunayksikkö. Allegrot ovat seitsemänvaunuisia kallistuvakorisia yksiköitä, joiden kokoonpanoa ei voi käytössä muuttaa. Näitä seitsemän vaunun yksiköitä voidaan tarpeen vaatiessa kuitenkin kytkeä kaksi kappaletta yhteen 14-vaunuisen junan muodostamiseksi. Allegro-junien rakenteellinen huippunopeus 220 km/h on suurin Suomen rautateillä käytettävä nopeus. Myös Pendolino- eli Sm3-sähkömoottorijuna kykenee 220 km/h nopeuteen, mutta tässä työssä keskitytään 14-vaunuiseen Allegro-junaan, sillä se on pisin ja raskain kokoonpano, jolle Suomessa sallitaan yli 200 km/h nopeus. Jarrupainoprosentin vaaditut arvot lähtönopeuksille 210 km/h ja 220 km/h on laskettu tämän kokoonpanon mukaan.

6.2 Laskennan lähtökohdat

Kaikissa työn laskentamenetelmissä on käytetty arvoja, jotka vastaavat huonointa mahdollista tilannetta jarrutustapahtuman kannalta. Tällä tavoin laskettu jarrutusmatka on vähintään yhtä pitkä kuin todellisessa tilanteessa. Laskennassa jarrutusmatkaa tarkastellaan jyrkimmän mahdollisen laskun tapauksessa, jolloin radan pituuskaltevuus on -15 . Tätä jyrkemmät kaltevuudet -40 :een asti ovat sallittuja, mutta niiden

rakentaminen on luvanvaraista. [35] Tässä työssä huomioidaan ainoastaan pituuskaltevuudet -15 :een saakka olettaen, että tätä jyrkempien laskujen liikennöinnin turvallisuus varmistetaan tapauskohtaisesti.

Keliolosuhteet määritellään laskentamenetelmissä vastaamaan huonoa keliä. JKV:n laskentamenetelmässä tämä tarkoittaa, että kelikertoimen k_s arvoksi asetetaan $0,75$. Muissa laskentamenetelmissä puolestaan täytyy määrittellä arvo kiskon ja pyörän väliselle kitkakertoimelle. Tässä työssä arvon määrittelyn perustana käytetään ETCS-laskennassa määriteltyä parametria junan jarrujen aiheuttamalle maksimihidastuvuudelle. Kansainvälinen oletusarvo tälle parametrille on $0,7 \text{ m/s}^2$. Liikennevirasto on valinnut tämän arvon käytettäväksi myös Suomessa ja todennut sen sopivan hyvin matkustajaliikennekäyttöön. [32] Tästä johtuen simulaatiomallissa ja fysikaalisessa mallissa on kiskon ja pyörän väliseksi kitkakertoimeksi määritelty

$$\alpha = \rho_T \cdot \frac{0,7 \text{ m/s}^2}{g} \quad (44)$$

Kuten luvussa 3.2.3 todettiin, huonoin mahdollinen tilanne junan kannalta on, jos kiskoilla on lehtiä. Tällöin kitkakertoimen arvo saattaa olla niinkin alhainen kuin $0,05$. Kun kuitenkin tarkastellaan junaa kokonaisuutena, tämä huono kitkakerroin vaikuttaa vain ensimmäisen kalustoyksikön pyörien alla. Mitä useampi pyöräkerta kulkee liukkaan kiskon yli, sitä enemmän kiskon pinta karhentuu ja sitä paremmat kitkaolosuhteet jäljempänä kulkevilla yksiköillä on. [39] Koska kokonaiselle junalle laskettavat ρ_T :n arvot vaihtelevat tyypillisesti välillä $1,04 \dots 1,07$, niin kaavan 44 mukaan α :n arvot vaihtelevat välillä $0,074 \dots 0,076$. Mikäli kitkakertoimen arvo asetetaan tälle välille, on se varsin realistinen arvio kertoimen arvosta huonoimmissa mahdollisissa olosuhteissa. Lisäksi rajoittamalla fysikaalisessa mallissa sekä simulaatiomallissa jarrujen tuottama kiihtyvyys nimenomaan $0,7 \text{ m/s}^2$:iin saadaan vertailukelpoiset arvot ETCS-menetelmällä laskettujen arvojen kanssa.

Kullakin menetelmällä on laskettu vaadittu minimijarrupainoprosentti lähtönopeuden funktiona 10 km/h välein. Lähtönopeudet $v_0 < 110 \text{ km/h}$ on jätetty huomiotta työssä, sillä nykyisten vaatimusten muuttamista ei nähty olennaiseksi näin alhaisilla nopeuksilla. Vaaditun jarrupainoprosentin arvoja on erikseen laskettu 2400 m ja 3600 m tiedonsiirtomatkoille. Tämän perusteena on, että Liikenneviraston Ratateknisten ohjeiden mukaan [7] mikäli raiteen suurin sallittu nopeus on yli 40 km/h mutta korkeintaan 160 km/h , tieto edessä olevasta seis-opasteesta on välitettävä kuljettajalle viimeistään 2400 m ennen opastetta. Mikäli raiteen suurin sallittu nopeus on yli 160 km/h , kuljettajan on saatava tieto vähintään 3600 m ennen opastinta. Yli 160 km/h nopeuksista pysähtyminen voidaan siis mitoittaa 3600 m tiedonsiirtomatkan mukaan, kun taas nopeusalueella $100 \dots 160 \text{ km/h}$ pysähtyminen täytyy mitoittaa 2400 m tiedonsiirtomatkan mukaan.

Turvallisen jarrutusmatkan perustaksi on tässä työssä otettu se etäisyys opastimesta, jolla kulunvalvonta voisi aloittaa automaattisen käyttöjarrutuksen siten, että juna pysähtyy viimeistään opastimelle ja että junan ei tarvitse turvautua hätäjarrutukseen. Jokaiselle lähtönopeuden arvolle on laskettu käyttöjarrutuksen aloituskäyrän etäisyys opastimesta siten, että junan jarrupainoprosenttia vaihdellaan. Tällä tavoin on etsitty pienin mahdollinen jarrupainoprosentin arvo, jolla edellä mainittu etäisyys on korkeintaan tiedonsiirtomatkan pituinen. JKV-menetelmässä tarkasteltavana etäisyytenä on käytetty C-käyrää ja ETCS-järjestelmässä SBI-käyrää. Fysiikan kaavoihin perustuvassa

menetelmässä sekä simulaatiomallissa on puolestaan otettu jarrutusmatkalaskennan tulos sellaisenaan ja lisätty siihen JKV-menetelmän turvamarginaali s_0 , joka on laskettu kaavan 10 mukaan. Funktionaalisesti tämä vastaa JKV:n C-käyrää.

6.3 Vaaditun jarrupainoprosentin laskenta

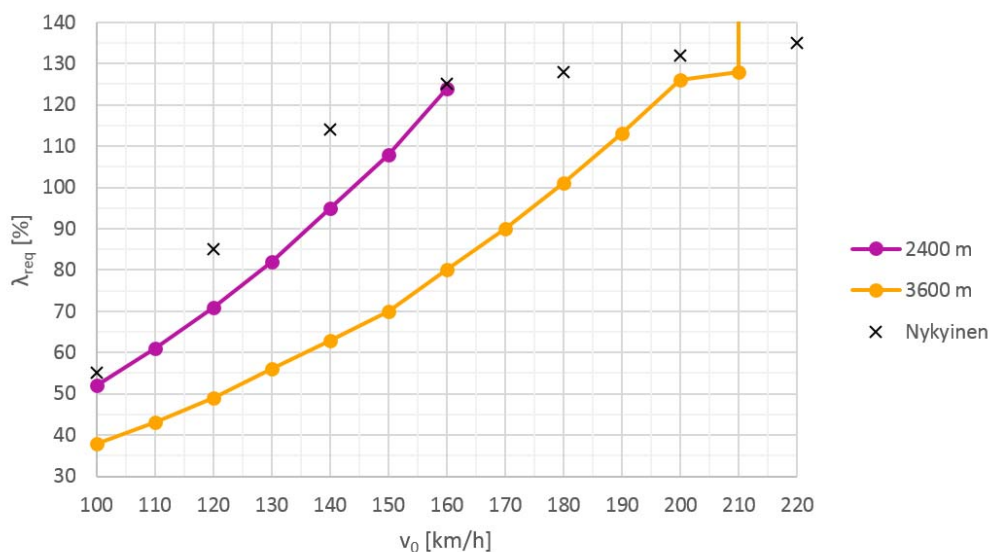
Tässä luvussa esitellään JKV- ja ETCS-menetelmällä sekä fysikaalisella mallilla ja simulaatiomallilla lasketut tulokset vaadituille jarrupainoprosentin arvoille. Tulokset esitetään sekä taulukkona että graafisesti. Tulosten lisäksi luvussa tehdään joitakin päähuomioita saaduista arvoista. Tarkempi analyysi on säästetty lukuun 6.4.

6.3.1 JKV-menetelmän mukaan

JKV-menetelmää käyttäen saadut tulokset vaadituiksi jarrupainoprosentin arvoiksi on esitetty taulukossa 7 sekä kuvassa 24. Tuloksista voidaan havaita, että JKV-algoritmin mukaan tässä työssä määritellyissä olosuhteissa 220 km/h nopeudesta ei olisi mahdollista pysähtyä 3600 m etäisyydellä lainkaan. 3600 m tiedonsiirtoetäisyydelle lasketun käyrän muodon muuttuminen kohdassa 200 km/h selittyy tarkasteltavan kalustotyypin muuttumisella. Tämä on selitetty aiemmin luvussa 6.1. Yli 160 km/h nopeuksille jarrutuskykyvaatimukset mitoitetaan ainoastaan 3600 m tiedonsiirtoetäisyyden mukaan luvussa 6.2 esitettyjen perusteiden nojalla.

Taulukko 7. JKV-menetelmällä lasketut jarrupainoprosentin vaaditut arvot lähtönopeuden funktiona 2400 m ja 3600 m tiedonsiirtomatkalle.

	v_0 [km/h]												
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
$\lambda_{req,2400}$	52	61	71	82	95	108	124	–	–	–	–	–	–
$\lambda_{req,3600}$	38	43	49	56	63	70	80	90	101	113	126	128	X



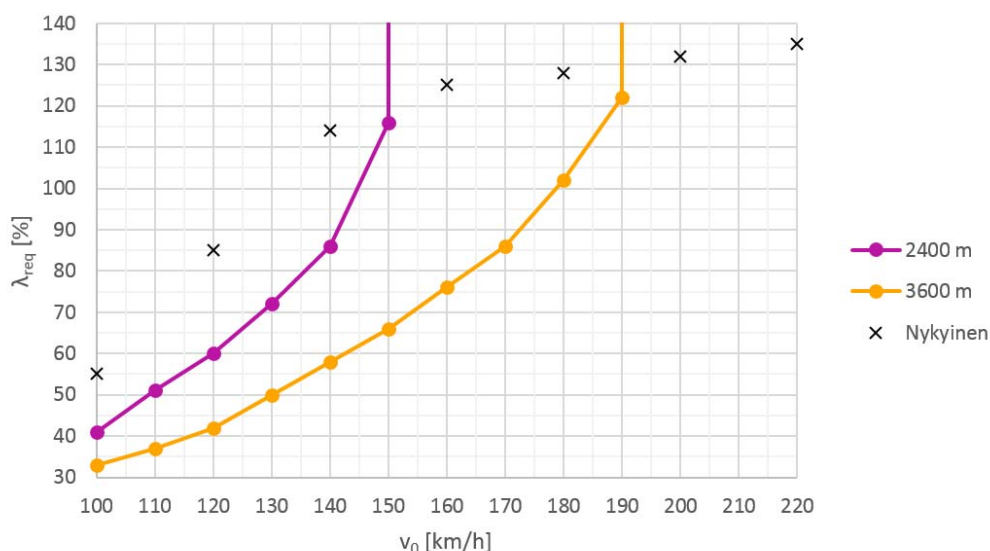
Kuva 24. JKV-menetelmällä laskettujen arvojen graafinen esitys.

6.3.2 ETCS-menetelmän mukaan

ETCS-menetelmää käyttäen saadut tulokset vaadituiksi jarrupainoprosentin arvoiksi on esitetty taulukossa 8 sekä kuvassa 25. Tulokset eroavat JKV-menetelmällä saaduista tuloksista huomattavasti. Tämä erilainen käyttäytyminen johtuu ETCS-menetelmän erilaisesta tavasta ottaa huomioon huonontuneet kitkaolosuhteet. Siinä missä JKV-menetelmässä junan jarrujen tuottamaa hidastuvuutta korjataan kelikertoimella, ETCS-menetelmässä tämä hidastuvuus rajoitetaan arvoon $0,7 \text{ m/s}^2$. Tämä johtaa siihen, että mikäli jarrupainoprosentti on yli tietyn kriittisen pisteen, ei sillä ole enää kovinkaan suurta vaikutusta junan jarrutusmatkaan. Kun hidastuvuus on rajoitettu $0,7 \text{ m/s}^2$:iin, tämä kriittinen jarrupainoprosentti on junatyypistä riippuen välillä 85...95. Tästä syystä ETCS-menetelmällä saatujen tuloksien kuvaajat nousevat jyrkästi, kun tämä arvo ylittyy. ETCS-menetelmän mukaan työssä käsitellyissä äärimmäisen huonoissa olosuhteissa junat eivät kykenisi jarruttamaan ajoissa 160 km:stä/h 2400 m matkalla eivätkä yli 190 km:stä/h 3600 m matkalla.

Taulukko 8. ETCS-menetelmällä lasketut jarrupainoprosentin vaaditut arvot lähtönopeuden funktiona 2400 m ja 3600 m tiedonsiirtomatkalle

	v ₀ [km/h]													
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	
λ _{req,2400}	41	51	60	72	86	116	X	–	–	–	–	–	–	
λ _{req,3600}	33	37	42	50	58	66	76	86	102	122	X	X	X	



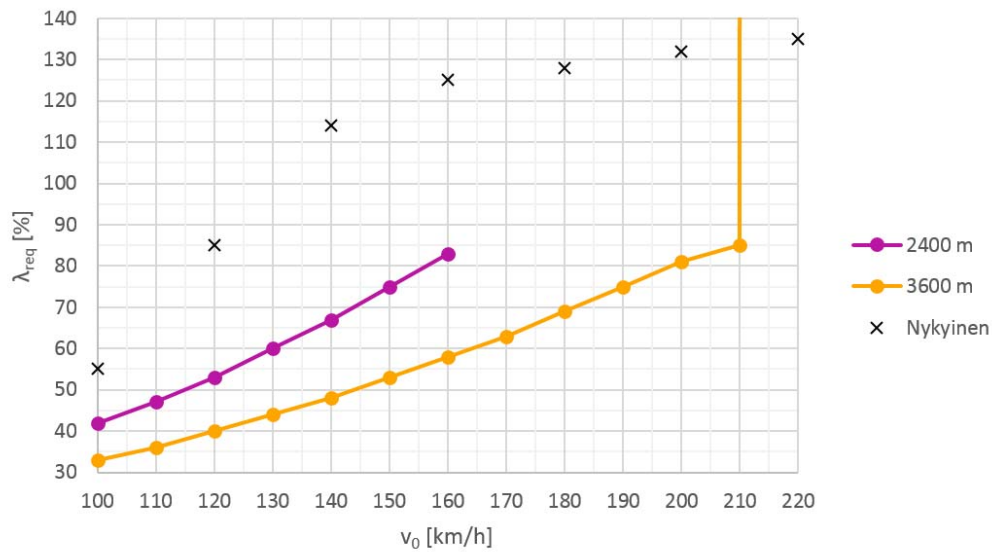
Kuva 26. ETCS-menetelmällä laskettujen arvojen graafinen esitys.

6.3.3 Fysiikan kaavoihin perustuvan menetelmän mukaan

Fysiikan kaavoihin perustuvaa menetelmää käyttäen saadut tulokset vaadituiksi jarrupainoprosentin arvoiksi on esitetty taulukossa 9 sekä kuvassa 26. Tulokset ovat huomattavasti alhaisempia kuin JKV- ja ETCS-menetelmien kohdalla. 210 km/h yläpuolella kuitenkin tässäkin menetelmässä tulee vastaan kriittinen jarrupainoprosentti, minkä vuoksi menetelmän mukaan juna ei kykenisi näin äärimmäisissä olosuhteissa pysähtymään 220 km/h nopeudesta ilman hätäjarrutusta.

Taulukko 9. Fysiikan kaavoihin perustuvalla menetelmällä lasketut jarrupainoprosentin vaaditut arvot lähtönopeuden funktiona 2400 m ja 3600 m tiedonsiirtomatkalle.

	v_0 [km/h]												
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
$\lambda_{\text{req},2400}$	42	47	53	60	67	75	83	–	–	–	–	–	–
$\lambda_{\text{req},3600}$	33	36	40	44	48	53	58	63	69	75	81	85	X



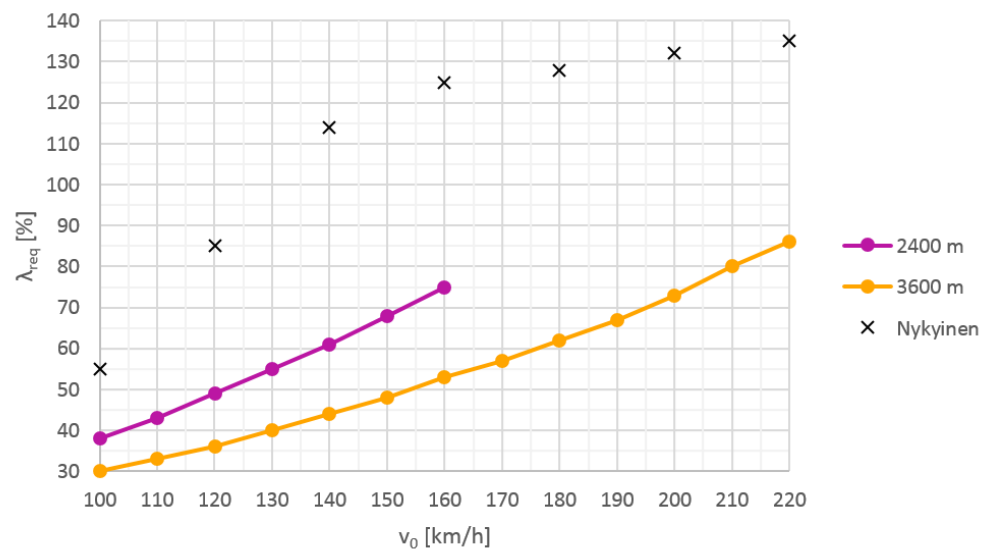
Kuva 26. Fysiikan kaavoihin perustuvalla menetelmällä laskettujen arvojen graafinen esitys.

6.3.4 Simulaatiomallin mukaan

Simulaatiomallin avulla saadut tulokset vaadituiksi jarrupainoprosentin arvoiksi on esitetty taulukossa 10 sekä kuvassa 27. Tämän malli on ainoa, jonka mukaan juna voisi turvallisesti pysähtyä ääriolosuhteissa 3600 m matkalla 220 km/h nopeudesta ilman hätäjarrutusta.

Taulukko 10. Simulaatiomallin avulla lasketut jarrupainoprosentin vaaditut arvot lähtönopeuden funktiona 2400 m ja 3600 m tiedonsiirtomatkalle.

	v_0 [km/h]												
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
$\lambda_{\text{req},2400}$	38	43	49	55	61	68	75	–	–	–	–	–	–
$\lambda_{\text{req},3600}$	30	33	36	40	44	48	53	57	62	67	73	80	86



Kuva 27. Simulaatiomallin avulla laskettujen arvojen graafinen esitys.

7 Ehdotukset tulevaisuuden toimenpiteiksi

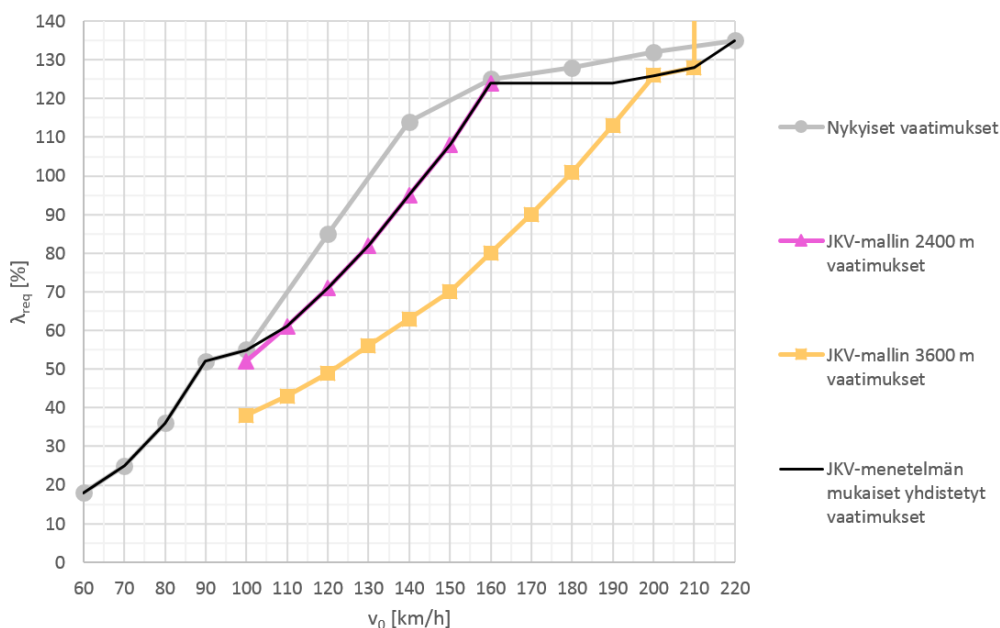
Laskennan pohjalta työssä laadittiin neljä vaihtoehtoista lähestymistapaa, joilla nykyisiä vaatimuksia voisi parantaa. Tässä luvussa esitellään nämä ehdotukset sekä pohditaan kunkin vaihtoehdon tuomia hyötyjä ja haittoja sekä vaadittuja toimenpiteitä.

7.1 Vaihtoehto 1

Ensimmäinen vaihtoehto pohjautuu jarrutuskykyvaatimusten uudistamiseen ilman kulunvalvontalaitteistojen uudelleenohjelmointia. ETCS-järjestelmän käyttöönottoon saakka junien kulkua ohjaisi edelleen JKV-järjestelmä oman sisäisen logiikkansa mukaisesti. Tällöin uuden jarrutuskykytaulukon pohjana täytyy käyttää JKV-laskentamenetelmän antamia tuloksia. Tämä johtuu siitä, että vaikka jarrutuskykyvaatimukset alennettaisiin JKV-menetelmällä laskettuja arvoja alemmaksi, JKV-laite aloittaisi silti automaattisen jarrutuksen oman logiikkansa mukaisesti. Tällöin olisi mahdollista ja jopa todennäköistä, että tilanteet, joissa automaattinen jarrutus kytkeytyy päälle tarpeettomasti, yleistyisivät huomattavasti. JKV-menetelmän mukaan lasketut jarrutuskykyvaatimukset on esitetty taulukossa 11, ja niiden muodostamista on havainnollistettu kuvassa 28.

Taulukko 11. JKV-laskentamenetelmän mukainen ehdotus junakaluston uusiksi jarrutuskykyvaatimuksiksi Suomessa. Arvot alle 110 km/h nopeuksille ovat säilyneet muuttumattomina nykyisestä taulukosta, sillä niiden tarkastelu on tämän työn rajauksen ulkopuolella.

Sn enintään [km/h]	110	120	130	140	150	160	200	210	220
λ vähintään [%]	61	71	82	95	108	124	126	128	135



Kuva 28. JKV-menetelmällä laskettujen arvojen graafinen esitys.

7.2 Vaihtoehto 2

Toinen vaihtoehto perustuu siihen, että luotaisiin kaksi rinnakkaista taulukkoa 2400 m ja 3600 m tiedonsiirtoetäisyyksien mukaan. Tällöin voitaisiin JKV-menetelmällä laskettujen arvojen perusteella sallia 3600 m tiedonsiirtoetäisyyksiä hyödyntävällä radalla paljon alhaisemmat jarrupainoprosentin arvot kuin vaihtoehdossa 1. Vaatimukset voisivat tällöin olla taulukon 12 mukaiset.

Taulukko 12. Rataosien tiedonsiirtoetäisyydet huomioiva JKV-menetelmän mukainen ehdotus junakaluston uusiksi jarrutuskykyvaatimuksiksi. Arvot alle 110 km/h nopeuksille ovat säilyneet muuttumattomina nykyisestä taulukosta, sillä niiden tarkastelu on tämän työn rajauksen ulkopuolella.

Sn enintään [km/h]	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
λ väh., 2400 m [%]	61	71	82	95	108	124	–	–	–	–	–	–
λ väh., 3600 m [%]	43	49	56	63	70	80	90	101	113	126	128	135

Tällaisen ratkaisun etuna olisi se, että pelkästään 3600 m tiedonsiirtoetäisyyttä hyödyntävillä radoilla liikennöivät junat voisivat liikennöidä huomattavasti väljemmillä vaatimuksilla. Konkreettista hyötyä tästä olisi esimerkiksi Tolstoin kohdalla. Junan Suomen puolella käyttämät rataosat* on kokonaisuudessaan varustettu 3600 m tiedonsiirtoetäisyyksillä. Tästä johtuen täysin vanhoista vaunuista koostuvalle Tolstoillekin ($\lambda \approx 90$) voitaisiin sallia 160 km/h nopeus nykyisen 120 km/h rajoituksen sijaan.

Haasteita kohdataan tapauksissa, joissa juna joutuisi vaihtamaan taulukkoa kesken matkan. Tarkastellaan esimerkiksi junaa, joka kulkee Helsingistä Kuopioon. Junan jarrupainoprosentiksi on laskettu $\lambda = 85$. Tällöin junalle voitaisiin taulukon 12 nojalla sallia nopeudeksi 160 km/h välillä Pasila–Kouvola, sillä tiedonsiirtoetäisyys on koko tällä matkalla vähintään 3600 m. Kouvolan ja Kuopion välillä tiedonsiirtoetäisyys on kuitenkin 2400 m. Kouvolassa jouduttaisiin siis vaihtamaan taulukko, jonka mukaan junan suurin sallittu nopeus määräytyy. Vaihdon jälkeen junan suurimmaksi sallituksi nopeudeksi tulisi 130 km/h. Mikäli veturinkuljettaja kuitenkin unohtaisi tehdä vaihdon, järjestelmä sallisi junalle 160 km/h nopeuden. Juna liikennöisi tällöin liian alhaisella jarrupainoprosentilla suurimpaan nopeuteensa nähden eikä kykenisi pysähtymään ajoissa opastimille. Inhimillisen erehdyksen vaara on tässä vaihtoehdossa suuri.

Eräs ratkaisumahdollisuus on, että inhimillisen erehdyksen vaara poistetaan siten, että JKV-laite saisi tiedon tiedonsiirtoetäisyyden muuttumisesta baliiseilta. Tämä muutos kuitenkin edellyttäisi JKV-laitteiden päivittämisen lisäksi baliisien uudelleenohjelmointia, mikä olisi varsin mittava operaatio ottaen huomioon, että baliiseja on Suomen valtion rataverkolla noin 25 000 [40].

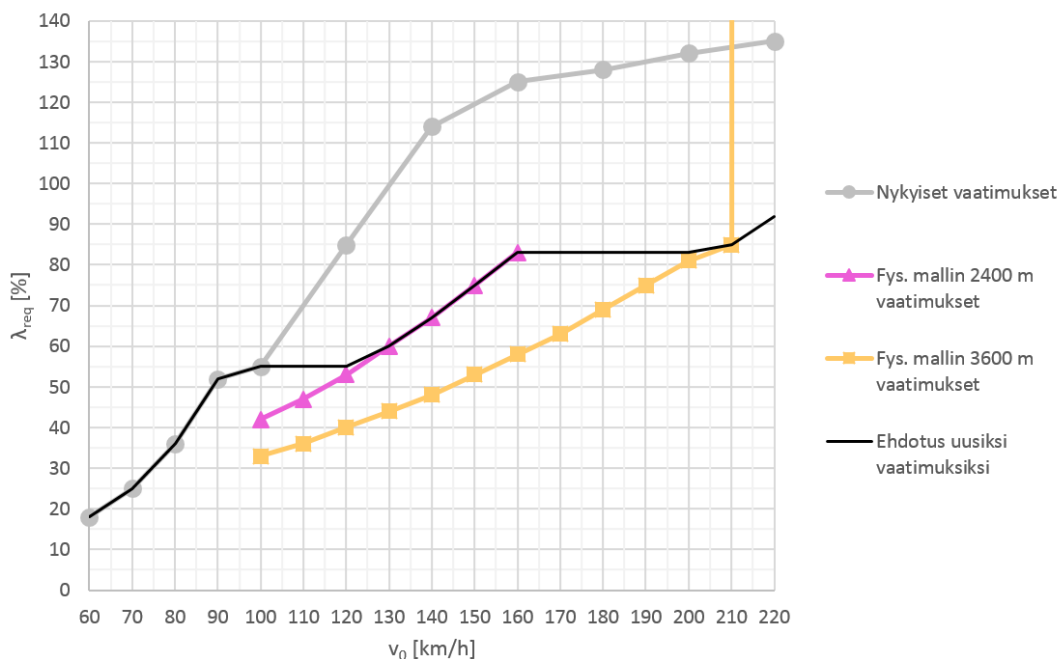
7.3 Vaihtoehto 3

Mikäli olisi mahdollista tehdä JKV-laitteistoihin ohjelmistopäivitys, jonka yhteydessä jarrutuskäyrien laskentalogiikkaa saataisiin muutettua, voitaisiin arvoja alentaa huomattavasti.

Fysikaalisen menetelmän mukaan vaatimukset voisivat tällöin olla taulukon 13 mukaiset. Kuvassa 29 on havainnollistettu vaatimusten muodostamista. Huomattavaa on, että mallin mukaan työssä määritellyissä huonoimmissa mahdollisissa olosuhteissa junat eivät kykenisi pysähtymään 220 km/h nopeudesta 3600 m matkalla millään jarrupainoprosentin arvolla. Simulaatiomallin mukaan tämä on kuitenkin mahdollista, ja sen avulla saatiin 220 km/h nopeudelle vaatimukseksi $\lambda = 86$. Korottamalla jarrujen tuottaman hidastuvuuden 0,7 m/s²:in raja-arvoa saatiin fysikaalisella mallilla vaatimukseksi $\lambda = 92$. Tätä arvoa on käytetty vaatimusten määrittelyssä 220 km/h nopeudelle.

Taulukko 13. Fysikaalisen mallin mukainen ehdotus junakaluston uusiksi jarrutuskykyvaatimuksiksi Suomessa. Arvot alle 110 km/h nopeuksille ovat säilyneet muuttumattomina nykyisestä taulukosta, sillä niiden tarkastelu on tämän työn rajauksen ulkopuolella.

Sn enintään [km/h]	110	120	130	140	150	160	210	220
λ vähintään [%]	55	55	60	67	75	83	85	92



Kuva 29. Fysikaalisella mallilla laskettujen arvojen graafinen esitys

Simulaatiomallin avulla saatiin vielä alhaisempia arvoja kuin tällä menetelmällä, mutta riittävän varmuusmarginaalin varmistamiseksi tämä vaihtoehto nojaa luvussa 5.1.4 esiteltyyn fysikaaliseen malliin. Nämä arvot ovat siis käytännössä alhaisimmat, joihin vaatimukset voitaisiin turvallisesti pudottaa. Arvojen turvallisuutta puoltavat seuraavat seikat:

1. Laskentamenetelmällä saatuihin käyttöjarrutuksen aloituskäyriin sisältyy ylimääräistä turvamarginaalia lähtönopeudesta riippuen 160...200 m.
2. Fysikaalisessa mallissa ei ole huomioitu junavastusvoimaa, joka todellisuudessa lyhentää jarrutusmatkaa lasketusta
3. Kaluston nimellinen jarrupaino on tyypillisesti määritelty hieman matalammaksi kuin kaluston todellinen jarrutusvoima antaisi myöten.
4. Kalustossa on turvallisuuden varmistamiseksi vielä hätäjarrutusta varten kiskojarut, joiden vaikutusta ei ole huomioitu laskelmissa.
5. Työssä määritettyjen huonoimpien mahdollisten olosuhteiden kaikkien tekijöiden yhtäaikainen toteutuminen on epätodennäköistä.

Huonoimpien olosuhteiden kaikkien tekijöiden yhtäaikaisella toteutumisella tarkoitetaan sitä, että

- junan jarrupainoprosentti on täsmälleen vaadittu minimiarvo ja
- koko tiedonsiirtoetäisyyden matkalla on jyrkin sallittu pituuskaltevuus ja
- koko tiedonsiirtoetäisyyden matkalla on huomattavasti alentunut kitkakerroin kiskon ja pyörän välillä ja
- juna on yli 400 m pitkä.

Mikäli yksikin näistä ehdoista ei toteudu, junan jarrutusmatka on työssä laadituilla vaatimuksilla lyhyempi kuin tiedonsiirtoetäisyys vaatisi.

Laskelmien luotettavuutta heikentävät seuraavat seikat:

1. Ehdotus uusiksi jarrutuskäyriin perustuu kirjoittajan johtamaan menetelmään, jota ei ole vielä validoitu.
2. Arvo suurimmalle pyörien kautta välitettävälle hidastuvuudelle perustuu kirjallisuuden pohjalta tehtyyn arvioon.
3. Luistonestolaitteiden toimintavarmuutta ei ole otettu huomioon laskelmissa.
4. Jarrulevyn ja -palan välisen vuorovaikutuksen heikkenemistä ei ole otettu huomioon.

Näiden komponenttien välillä saavutettava kitkakerroin voi heikentyä esimerkiksi pakkautuvan lumen seurauksena.

7.4 Vaihtoehto 4

Mikäli fysikaalisen mallin mukaiset vaatimukset kyetään validoimaan ja koetuloksilla osoittamaan käyttökelpoisiksi, saavutetaan niitä käyttämällä työn suurin hyöty. Ongelma on kuitenkin, että JKV-laitteet aloittaisivat kuitenkin automaattisen jarrutuksen paljon aikaisemmin kuin olisi tarvetta. Vaikka JKV-laitteiden uudelleenohjelmointi ei olisi mahdollista esimerkiksi budjettisyistä, voitaisiin fysikaalisen mallin tuottamat täydet hyödyt silti saavuttaa. Tässä vaihtoehdossa JKV-laitteille ei syötettäisi junan todellista jarrupainoprosenttia, vaan muunnostaulukon avulla laskettu arvo. Tämä muunnostaulukko on kuvattu taulukossa 14.

Taulukko 14. Muunnostaulukko, jonka mukaan kuljettaja syöttää todellisen jarrupainoprosentin λ_{tod} perusteella JKV-laitteelle junan muunnetun jarrupainoprosentin λ_{input} .

λ_{tod}	λ_{input}	λ_{tod}	λ_{input}
0...55	= λ_{tod}	75...82	108
56...59	71	83...84	126
60...66	82	85...91	128
67...74	95	92...	135

Kun junan todellinen jarrupainoprosentti on laskettu, kuljettaja syöttäisi JKV:lle jarrupainoprosentiksi taulukon 14 mukaisen vastaavan syötearvon. Tällöin JKV-laitteeseen saadaan uskomaan, että junalla on JKV-menetelmän mielestä riittävä jarrutuskyky pysähtyäkseen suurimmasta nopeudesta tiedonsiirtomatkalla, vaikka todellisuudessa junan jarrutuskyky on alhaisempi. Tällöinkin se on kuitenkin fysikaalisen mallin näkökulmasta riittävä ja junan pitäisi pysähtyä ajoissa. JKV-laitte ei myöskään aloittaisi automaattista jarrutusta liian aikaisin.

Esimerkiksi, jos junan todelliseksi jarrupainoprosentiksi on laskettu 80, niin JKV-laitteelle junan jarrupainoprosentiksi syötetään 108. Tällöin JKV-menetelmäkin sallii junalle fysikaalisen menetelmän pohjalta laaditun taulukon mukaisen suurimman nopeuden 150 km/h.

Tällä vaihtoehdolla saavutettaisiin alhaisimmat mahdolliset vaaditun jarrutuskyvyn arvot ilman, että JKV-laitteiden toimintaan jouduttaisiin puuttumaan. Suurimpia haasteita ovat kuitenkin kuljettajien kouluttaminen käytäntöön, jossa nykyhetken näkökulmasta katsottuna syötetään järjestelmään virheellisiä arvoja. Selvitetävää on runsaasti myös siinä, kuinka tämän jarrupainoprosentin arvojen muuntamisen voisi toteuttaa niin, ettei se olisi kuljettajien vastuulla.

7.5 Vaihtoehtojen vertailua

Matkustajajunien jarrupainoprosentti on tyypillisesti niin korkea, että se sallii nykyisilläkin vaatimuksilla junien kulkea rakenteellista huippunopeuttaan. Tämä kuitenkin pätee ainoastaan, jos junan jarrut ovat täydessä toimintakunnossa. Pääasiallinen hyöty, joka uusilla vaatimuksilla saavutettaisiin, liittyykin nimenomaan junien nopeuden rajoittamiseen poikkeustilanteissa. Nykyinen jarrutuskykytaulukko rajoittaa junien nopeutta poikkeustilanteissa. Tarkastellaan esimerkiksi yksirunkoista Sm3- eli Pendolino-junaa, jossa on kuusi vaunua. Taulukossa 15 on esitettyä tällaiselle junalle sallittavat suurimmat nopeudet junan jarruttomien vaunujen määrän funktiona.

Kuten taulukosta huomataan, nykyisten vaatimusten mukaan yhdenkin vaunun jarruttomuus johtaa siihen, että suurin sallittu nopeus joudutaan alentamaan 220 km:stä/h 140 km:iin/h. Tällainen nopeudenalennus suhteellisen pienessäkin poikkeustilanteessa aiheuttaa kohtuuttomia myöhästymisiä, joilla on vaikutus paitsi asiakaskokemukseen, myös koko radan kapasiteetin hallintaan. Millä tahansa tässä työssä esitetyistä muutosvaihtoehdoista saavutettaisiin parempia arvoja. Vaihtoehdon 1 mukaan junan, jossa yhden vaunun jarrut ovat toimintakyvyttömät, nopeus voitaisiin nostaa 150 km:iin/h. Vaihtoehdolla 2 rajoitus olisi 2400 m tiedonsiirtoetäisyyksillä sama, mutta 3600 m tiedonsiirtoetäisyyksillä nopeus voitaisiin nostaa 190 km:iin/h.

Fysikaalista laskentamallia hyödyntävillä vaihtoehdoilla 3 ja 4 nopeutta ei tarvitsisi alentaa lainkaan – itse asiassa junasta voitaisiin sulkea vielä toisenkin vaunun jarrut ilman, että nopeutta tarvitsisi rajoittaa ollenkaan. Eri vaihtoehdoilla saavutettavat hyödyt vaihtelevat siis suuresti. Vaihtoehto 1 tarjoaa pientä parannusta ja vaihtoehto 2 kohtalaisen suurta parannusta. Vaihtoehdoilla 3 ja 4 saataisiin merkittävä parannus nykytilanteeseen.

Taulukko 15. Yksirunkoisen Sm3-junan suurin sallittu nopeus (km/h) jarruttomien vaunujen määrän funktiona. Esitettynä on sekä nykytilanne että kullakin työssä esitetyllä vaihtoehdolla saavutettavat arvot.

Jarruttomien vaunujen lukumäärä	0	1	2	3	4	5	6
Jarrupainoprosentti	138	115	92	69	46	23	0
Nykyiset vaatimukset	220	140	120	100	80	60	0
Vaihtoehto 1	220	150	130	110	80	60	0
Vaihtoehto 2 (2400 m)	160	150	130	110	80	60	0
Vaihtoehto 2 (3600 m)	220	190	170	140	80	60	0
Vaihtoehdot 3 & 4	220	220	220	140	80	60	0

Kaikkien vaihtoehtojen toteuttamiseen tarvitaan tiettyjä työvaiheita. Kustannushyöty-analyysin sekä riskienarvioinnin tekeminen on jokaisen vaihtoehdon kohdalla ehdoton. Lisäksi mikä tahansa muutos jarrutuskykyvaatimuksiin aiheuttaa sen, että liikennöitsijöiden sisäiset junienhallintajärjestelmät saatetaan joutua päivittämään. Vaihtoehto 1 on selkeästi esitetyistä malleista kevyin, sillä sen implementointi ei juurikaan vaadi muita toimenpiteitä. Toisaalta tällöin myös saavutettavat hyödyt jäävät pieniksi verrattuna muihin vaihtoehtoihin. Vaihtoehdot 2, 3 ja 4 sen sijaan vaativat perusteellisempia selvityksiä, ennen kuin kunkin vaihtoehdon mukainen uusittu jarrutuskykytaulukko voidaan ottaa käyttöön.

Vaihtoehdossa 2 käytettäisiin kahta rinnakkaista taulukkoa, joista toinen pätsi 2400 m ja toinen 3600 m tiedonsiirtomatkalla varustetuille radoille. Haastavimmaksi tekijäksi tässä vaihtoehdossa muodostuu konkreettisen toteutustavan valinta ja miten se vaikuttaa kuljettajien työskentelyyn. Tarvittavia selvityksiä ovat vähintään

- jokaisen valtion rataverkon rataosan tiedonsiirtoetäisyyksien selvittäminen
- niiden matkustajajunareittien tunnistaminen, joilla taulukkoa jouduttaisiin vaihtamaan kesken ajon
- kuljettajien koulutuksen järjestäminen kahden taulukon järjestelmän käyttöön.

Mikäli taulukon vaihtaminen kesken ajon yhdistettäisiin kuljettajien työtehtäviin, kasvaisi inhimillisen erehdyksen vaara liian korkeaksi. Siksi tätä vaihtoehtoa varten tulisi myös selvittää, kuinka paljon maksaa automatiikka, joka varmistaisi oikealla vaatimustaulukolla liikennöinnin. Tämä sisältää JKV-laitteen päivityksen, jonka avulla JKV-laite voisi tunnistaa tiedonsiirtoetäisyyden muuttumisen ja säätää maksiminopeutta sen mukaisesti. Lisäksi rataverkolle tulisi asettaa merkit, jotka ilmoittaisivat myös kuljettajalle tiedonsiirtoetäisyyden muuttumisesta. Edellä mainitut toimenpiteet voisi kuitenkin myös kiertää selvittämällä, mitä maksaisi koko Suomen rataverkon muuttaminen 3600 m tiedonsiirtoetäisyyksille. Tällöin kahta rinnakkaista taulukkoa ei tarvittaisi ja jarrutuskykyvaatimuksia saataisiin alennettua entisestään. Kumpikin

näistä toimintamalleista on kuitenkin melko kallis, ja siksi vaihtoehdon 2 kustannukset ovat lähtökohtaisesti hyvin suuret.

Koska vaihtoehto 3 nojaa kirjoittajan johtamaan kaavaan, vaihtoehtoon 3 liittyvä suurin työmäärä tulee tulosten validoinnista. Itse laskentamenetelmän todenmukaisuuden tarkistamisen lisäksi vaadittaisiin pitkälinen sarja koeajoja, joissa laskentamenetelmän toimivuutta voisi testata. Lisäksi vaihtoehto 3 vaatii niin ikään JKV-laitteiden päivityksen, sillä mikäli laitteiden sisäistä laskentalogiikkaa ei muuteta, laitteet aloittaisivat automaattisen jarrutuksen paljon aikaisemmin kuin olisi tarpeen. JKV-laitteiden päivitys yhdessä jopa vuosia kestävien koeajojen kanssa tekevät tästä vaihtoehdosta varsin työlää ja kalliin. Toisaalta vaihtoehdolla saavutettaisiin erittäin suuret hyödyt ilman, että inhimillisen virheen riski kasvaisi merkittävästi nykyisestä.

Vaihtoehdossa 4 otettaisiin käyttöön vaihtoehdon 3 vaatimukset siten, että JKV-laitteita ei tarvitsisi päivittää. Tämä saavutettaisiin erityisen muunnostaulukon avulla, jonka mukaan JKV-laitteille syötettäisiin korkeampi jarrupainoprosentti. Koska tämän vaihtoehdon vaatimukset ovat samat kuin vaihtoehdossa 3, koskevat laskentamenetelmän validointi ja koeajojen järjestäminen myös tätä vaihtoehtoa. JKV-laitteita ei tarvitse tässä vaihtoehdossa päivittää, mutta sen sijaan merkittäviä resursseja tulisi osoittaa kuljettajien kouluttamiseen. Lisäksi järjestelmän oikeellisuuden perusteellinen lienee työläs prosessi.

Taulukkoon 16 on koottu työssä luotujen vaihtoehtojen keskeiset ominaisuudet. Huomattavaa on, että todellisista kunkin vaihtoehdon toteuttamiseen liittyvästä työmäärästä sekä inhimillisen virheen riskistä ei ole tässä vaiheessa saatavilla tietoa, vaan taulukossa esitetyt määreet ovat kirjoittajan arvioita.

Taulukko 16. Työssä esitettyjen vaihtoehtojen keskeiset ominaisuudet.

Vaihtoehto	1	2	3	4
Vaikutus liikennöintiin	Pieni	Kohtalainen	Suuri	Suuri
Vaatii JKV:n uudelleenohjelmoinnin	Ei	Kyllä	Kyllä	Ei
Inhimillisen virheen riski käytössä	Pieni	Suuri	Pieni	Kohtalainen
Toteuttamiseen tarvittavan työn määrä	Pieni	Suuri	Suuri	Suuri

8 Yhteenveto

Työssä oli tarkoitus tarkastella Suomessa junille asetettuja jarrutuskykyvaatimuksia ja niiden relevanssia yli kaksi vuosikymmentä niiden laatimisen jälkeen. Erityisesti matkustajaliikenteessä uudempi kalusto, ratojen paremmat rakenteet sekä turvalaite-tekniikan kehittyminen osiltaan mahdollistavat korkeammat nopeudet kuin aiemmin. Toisin kuin 1990-luvun alussa, Sm3- ja Sm6-moottorijunilla voidaan nykyään ajaa niiden rakenteellista huippunopeutta 220 km/h, ja nopeimmat veturivetoiset junatkin kulkevat jopa 200 km/h nopeudella. Tässä työssä keskityttiin nimenomaan nopeiden kaukoliikenteen henkilöjunien jarrutuskykyvaatimuksiin, sillä näin suurissa nopeuksissa jarrutuskykyvaatimusten merkitys korostuu. Lisäksi tavarajunaliikenne on kokonaisuutena paljon moniulotteisempi kuin matkustajaliikenne, joten sen vastaavan kaltainen analysointi olisi ollut liian laaja työ tämän opinnäytteen puitteisiin.

Jarrutuskykyvaatimusten laskemisen lisäksi työssä esiteltiin junien jarrujärjestelmien teknologiat sekä kehittyminen. Yksi tämän työn saavutuksista onkin jarrujärjestelmiin, jarrutusmatkalaskentaan ja jarrutuskykyvaatimukseen liittyvän tiedon ja kaavojen kerääminen yhteen dokumenttiin. Junien jarrujen vallitsevana käyttövoimana on 1890-luvulta saakka ollut paineilma. Paineilmajärjestelmän avulla on helppoa sekä kontrolloida koko junan kaikkien yksiköiden jarruja että tuottaa jarruttamiseen tarvittava voima. Paineilmalla ohjataan tyypillisesti kitkajarruja, jotka mekaanisen kontaktin avulla muuntavat junan liike-energiaa lämmöksi. Viime vuosikymmeninä mikroprosessoriteknologian kehittyessä myös sähköisesti ohjatut EP-jarrujärjestelmät ovat yleistyneet etenkin matkustajajunakalustossa. Näissäkin järjestelmissä käytetään kuitenkin paineilmaa jarruvoiman tuottamismekanismina. Paineilmapohjaisten jarrujen lisäksi junaa voidaan jarruttaa moottoreiden dynaamisilla jarruilla sekä suoraan kiskoon vaikuttavilla kitkajarruilla. Suomalaiset rautatieoperaattorit eivät kuitenkaan laske näitä jarrutyyppejä junan jarrutuskykyyn, sillä niiden toiminta ei ole varmaa esimerkiksi poikkeustilanteissa, joissa junan sähkönsyöttö häiriintyy tai katkeaa. Paineilmajärjestelmät on puolestaan suunniteltu siten, että missä tahansa häiriötilanteessa jarrut kiinnittyvät automaattisesti.

Jarrutuskykyvaatimukset määritellään niin kutsutun jarrupainojärjestelmän avulla. Järjestelmässä jokaiselle kalustoyksikölle määritellään käyttöönoton yhteydessä yksikön jarrutuskykyä kuvaava suure, jonka nimi on jarrupaino. Kun koko junan yksiköiden jarrupainot lasketaan yhteen ja tämä summa jaetaan junan staattisella massalla, saadaan junan jarrupainoprosentti. Jarrutuskykyvaatimukset on esitetty taulukkona, jossa määrätään tietylle nopeudelle tietty jarrupainoprosentin minimiarvo, joka junalla täytyy olla saadakseen kulkea kyseistä nopeutta.

Nykyiset jarrutuskykyvaatimukset eivät juurikaan vaikuta liikennöintiin, kun junan jarrut ovat täysin toimintakykyiset. Matkustajaliikennekalustolla on tyypillisesti niin hyvä jarrutuskyky, että sille sallitaan jarrutuskykyvaatimusten puolesta suurimmaksi nopeudeksi oma rakenteellinen huippunopeutensa. Liikennöitsijät ovat kuitenkin huomanneet viime aikoina Suomessa, että nykyisin käytössä olevat jarrutuskykyvaatimukset aiheuttavat kohtuutonta haittaa junien liikennöinnille erityisesti talvi-aikaan. Talvella junan nostattama pölyävä lumi kertyy helposti jarrumekanismeihin, mikä johtaa siihen, että osassa yksiköistä saatetaan joutua sulkemaan jarrut, eli poistamaan ne tilapäisesti käytöstä. Tällöin junan jarrutuskyky alentuu ja nykyisten jarrutuskykyvaatimusten perusteella junan suurinta nopeutta joudutaan alentamaan.

merkittävästi. Tämä aiheuttaa pienissäkin poikkeustilanteissa kohtuuttomia myöhästymisiä, joilla on vaikutus paitsi asiakastytyväisyyteen myös koko rataverkon aikataulujen pitävyyteen.

Työn yhteydessä yritettiin selvittää, millä perusteilla nykyisin voimassa olevat jarrutuskykyvaatimukset on aikanaan laadittu. Näiden vaatimusten perusteista löytyi kuitenkin hyvin vähän dokumentaatiota. Tästä syystä työssä laskettiin junille uudet jarrutuskykyvaatimukset alusta lähtien uudelleen. Vaatimukset laskettiin käyttäen viittä eri menetelmää junan jarrutusmatkan arvioimiseksi. Kullakin menetelmällä etsittiin pienin jarrupainoprosentin arvo, jolla juna pysähtyy tietystä nopeudesta matkalla, jota kutsutaan tiedonsiirtoetäisyydeksi. Tämä etäisyys on matka seisopastetta näyttävältä opastimelta siihen pisteeseen, jossa junan kulunvalvontalaite saa ensimmäisen tiedon kyseisestä opasteesta. Viidestä työssä käytetystä laskentamenetelmästä kirjallisuuteen pohjautuvia ovat Mindenin kaava sekä suomalaisen ja eurooppalaisen kulunvalvontajärjestelmän laskenta-algoritmit. Lisäksi työn yhteydessä laadittiin kokonaan uusi laskentamenetelmä fysiikan kaavojen sekä kirjallisuuden pohjalta. Tarkempaa tarkastelua varten luotiin vielä lisäksi Matlab/ SIMULINK-pohjainen simulaatiomalli, jolla jarrutustapahtumaa mallinnettiin. Mindenin kaava jätettiin lopulta tarkastelusta pois, kun havaittiin, ettei se sovellu yli 160 km/h nopeuksille.

Laskennan luotettavuuden kasvattamiseksi tarkasteltiin pelkkää käyttöjarrutusta. Nopeammin reagoiva hätäjarrutus, kiskojaarrutus ja dynaamiset jarrut jätettiin huomiotta. Ympäristön olosuhteet asetettiin vastaamaan huonoimpia realistisia olosuhteita jarrutustapahtuman kannalta. Vaikuttavimmat ympäristön parametreista ovat radan pituuskaltevuus sekä kiskon ja pyörän välinen kitkakerroin. Radan pituuskaltevuus asetettiin vastaamaan 15 laskua, joka on jyrkin sallittu arvo ilman erillislupaa. Kiskon ja pyörän välinen kitkakerroin asetettiin vastaamaan tilannetta, jossa kiskoilla on märkiä lehtiä. Kitkakertoimen arvo on tällöin noin 0,075. Junatyypit, joita laskuissa mallinnettiin, ovat pisimmät ja raskaimmat junakokoonpanot, joita Suomen matkustajaliikenteessä käytetään. Nämä junat ovat 15-vaunuinen InterCity-juna, kaksirunkoinen Allegro-juna ja 16-vaunuinen kansainvälinen pikajuna Tolstoi.

Laskennan tulokset ovat selvät. Käyttäen mitä tahansa työssä hyödynnettyä laskentamenetelmää saadaan tulokseksi, että nykyiset vaatimukset ovat ainakin jonkin verran liian korkeat. Työn loppupäätelmänä siis esitetään, että jarrutuskykyvaatimuksissa on todella parantamisen varaa. Työssä muodostettiin laskennan tulosten perusteella neljä vaihtoehtoista mallia, joilla nykyisiä jarrutuskykyvaatimuksia voitaisiin muuttaa. Tämän työn jälkeen seuraava ehdotettu toimenpide on kattavan kustannushyötyanalyysin sekä riskienarvioinnin tekeminen kaikille esitetyille vaihtoehdoille.

Viitteet

- [1] Knorr-Bremse. Grundlagen der Bremstechnik. 1. painos. Knorr-Bremse GmbH, 2002.
- [2] Sandholm, H. Kiskokalustotekniikka. Jarrujärjestelmät ja jarruttaminen. Teknillisen korkeakoulun Kuljetusvälinetekniikan laitosta varten laadittu luentomoniste. Valtionrautatiet, 1994.
- [3] Nummelin, M. & Toikkanen, S. (Liikennevirasto). Haastattelu, 9.2.2017.
- [4] Euroopan komissio. Euroopan unionin rautatiejärjestelmän osajärjestelmää ”käyttötoiminta ja liikenteen hallinta” koskeva yhteentoimivuuden tekninen eritelmä (YTE). 2012.
- [5] Pugi, L., Malvezzi, M., Allotta, B., Banchi, L. & Presciani, P. A parametric library for the simulation of a union internationale des chemins de fer (uic) pneumatic braking system. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 218(2):117–132, 2004.
- [6] Järvinen, L & Viitanen, J. Rautatieturvallitteet. Liikennevirasto, Helsinki, 2014. ISBN: 978-952-255-369-0.
- [7] Liikennevirasto. Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 10: Junien kulunvalvonta JKV. Liikenneviraston ohjeita, 9/2012.
- [8] Liikennevirasto. Liikennöinti valtion rataverkolla. Liikenneviraston ohjeita, 23/2015.
- [9] Liikennevirasto. Junien kulunvalvontajärjestelmän kaltevuusmäärittelyn rata- ja opastintiedot rekistereissä. Liikenneviraston ohjeita, 13/2015.
- [10] Tolamo, H., Korhonen, P., Rämä, H., Heikkinen, A., Vauhkonen, M. & Myyrä, P. Jarrupainojärjestelmän koulutusryhmän loppuraportti. Valtionrautatiet, 1992.
- [11] Euroopan komissio. Euroopan unionin rautatiejärjestelmän liikkuvan kaluston osajärjestelmää ”veturit ja henkilöliikenteen liikkuva kalusto” koskeva yhteentoimivuuden tekninen eritelmä (YTE). 2014.
- [12] Pugi, L., Fioravanti, D. & Rindi, A. Modelling the longitudinal dynamics of long freight trains during the braking phase. 12th IFToMM World Congress, 2007.
- [13] Westinghouse, G. Improvement in steam-power-brake devices. U.S. Patent 88929, 1869.
- [14] Heikkilä, H. (VR Group). Sähköpostikeskustelu, 3.3.2017.
- [15] Heikkilä, H. (VR Group). Sähköpostikeskustelu, 21.3.2017.
- [16] Kuva. URL: <http://www.rmweb.co.uk/community/index.php?/blog/74/entry-15193-where-red-and-white-trains-rest-open-day-at-leipzig-ice-workshops-19-nov-14/>.

- [17] Kuva: Juhani Pirttilahti. URL: <http://www.vaunut.org/kuva/69330>.
- [18] Vanhatalo, E. Jarrutusenergian hyötykäyttömahdollisuuksia Helsingin metroliikenteessä. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu, 2012.
- [19] Olofsson, U. Adhesion and friction modification. Wheel–rail interface handbook, s. 510–524. Woodhead Publishing, 2009. ISBN: 978-1-84569-412-8.
- [20] Chen, H., Ban, T., Ishida, M. & Nakahara, T. Experimental investigation of influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions. Wear, 265:1504–1511, 2008.
- [21] Kalker, J. Three-dimensional elastic bodies in rolling contact. 1. painos. Springer Science+Business Media, 1990. ISBN: 978-90-481-4066-4.
- [22] Liikennevirasto. Eurooppalainen rautatieliikenteen hallintajärjestelmä ERTMS – Suomen kansallinen täytäntöönpanosuunnitelma Euroopan komissioon vuonna 2017. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä, 42/2017 (luonnos 25.1.2017).
- [23] Kuva: Kurt Ristniemi. URL: <http://www.vaunut.org/kuva/95849>.
- [24] Härkönen, A., Lehmusto, J. & Peltonen, J. ATP-VR/RHK STM-N Functional Requirements Specification. Liikennevirasto, 2011.
- [25] Wende, D. Fahrdynamik des Schienenverkehrs. Springer, 2003. ISBN: 978-3-519-00419-6.
- [26] VR Group. EP-jarrun vaikutus jarrujen toimintaviiveeseen. Koetulosraportti, 2013.
- [27] Heikkilä, H. (VR Group). Sähköpostikeskustelu, 10.5.2017.
- [28] European Union Agency for Railways. Introduction to ETCS braking curves. Verkko-osoite. Haettu 11.4.2017. URL: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/Braking-curves-Introduction.aspx>.
- [29] European Union Agency for Railways. SUBSET-026 v300. Verkko-osoite. Haettu 25.4.2017. URL: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/SUBSET-026v300.aspx>.
- [30] European Union Agency for Railways. Braking Curves Simulation Tool. Verkko-osoite. Haettu 7.4.2017. URL: <http://www.era.europa.eu/Coreactivities/ERTMS/Pages/Braking-Curves-Simulation-Tool.aspx>.
- [31] UIC. Määrelehti 544-1. 5. painos, 2013.
- [32] Liikennevirasto. Suomen kansalliset ERTMS/ETCS-parametrit, yleisohjeistus. Liikenneviraston ohjeita, 20/2015.
- [33] Bureika, G. & Mikalinas, Š. Research on the compatibility of the calculation methods of rolling-stock brakes. Transport, 23(4):351–355, 2008.

[34] SFS-EN 14531-1. Railway applications. Methods for calculation of stopping and slowing distances and immobilization braking. Part 1: General algorithms utilizing mean value calculation for train sets or single vehicles. Suomen standardoimisliitto SFS, 2015.

[35] Liikennevirasto. Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 2: Radan geometria. Liikenneviraston ohjeita, 3/2010.

[36] Spiess, P. Fahrdynamik des Schienenverkehrs. Luentokalvosarja. DB Systemtechnik, 2005. Haettu 26.4.2017.

URL: https://www.ids.uni-hannover.de/fileadmin/IDS/ids_lehre/SFZ/Fahrdynamik_2006.pdf.

[37] Rochard, B. & Schmid, F. A review of methods to measure and calculate train resistances. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 214:185–199, 2000.

[38] VR Group. Junakalustoyksiköiden tekniset tiedot kalustoluetteloista.

[39] Heikkilä, H. (VR Group). Haastattelu, 5.4.2017.

[40] Liikennevirasto. Konkretiaa eurooppalaisen junien kulunvalvonnan käyttöönottoon rataverkolla ja vetävässä kalustossa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä, 44/2014.

A Jarrutusmatkan laskenta fysikaalisilla kaavoilla

Alla on esitetty esimerkki luvussa 5.1.4 esitellyn laskentamenetelmän soveltamisesta.

Lähtötiedot:

Junan kokoonpano	Sr2 + Ed + Ed + Ed + ERd + Edfs + Edo
m_{st}	461 t
B	626 t
λ	135 ‰
L	178,9 m
i	5 ‰
α	0,11
v_0	180 km/h = 50 m/s

$$\rho_T = 0,11 \cdot \frac{84 \text{ t}}{461 \text{ t}} + 1,04 \approx 1,06 \quad (\text{A1})$$

$$b_g = \frac{5 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{1000 \cdot 1,06} \approx 0,046 \text{ m/s}^2 \quad (\text{A2})$$

$$b_{b,\max} = \frac{135}{118 \cdot 1,06} \approx 1,080 \text{ m/s}^2 \quad (\text{A3})$$

$$b_{b,\lim} = \frac{0,11 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{1,06} \approx 1,018 \text{ m/s}^2 \quad (\text{A4})$$

$$b_{b,\text{true}} = \min(1,080 \text{ m/s}^2, 1,018 \text{ m/s}^2) = 1,018 \text{ m/s}^2 \quad (\text{A5})$$

$$t_b = 4 + \frac{178,9 \text{ m}}{80} \approx 6,236 \text{ s} \quad (\text{A6})$$

$$k = \frac{1,080 \text{ m/s}^2}{6,236 \text{ s}} \approx 0,173 \text{ m/s}^3 \quad (\text{A7})$$

$$t_r = \frac{1,018 \text{ m/s}^2}{0,173 \text{ m/s}^3} \approx 5,884 \text{ s} \quad (\text{A8})$$

$$v_1 = 50 \text{ m/s} - 0,046 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ s} = 49,954 \text{ m/s} \quad (\text{A9})$$

$$x_1 = 50 \text{ m/s} \cdot 1 \text{ s} - \frac{1}{2} \cdot 0,046 \text{ m/s}^2 \cdot (1 \text{ s})^2 = 49,977 \text{ m} \quad (\text{A10})$$

$$\begin{aligned} v_2 &= 49,954 \text{ m/s} - 0,046 \text{ m/s}^2 \cdot 5,884 \text{ s} - \frac{1}{2} \cdot 0,173 \text{ m/s}^3 \cdot (5,884 \text{ s})^2 \\ &\approx 46,689 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (\text{A11})$$

$$\begin{aligned} x_2 &= 49,954 \text{ m/s} \cdot 5,884 \text{ s} - \frac{1}{2} \cdot 0,046 \text{ m/s}^2 \cdot (5,884 \text{ s})^2 - \frac{1}{6} \cdot 0,173 \text{ m/s}^3 \cdot (5,884 \text{ s})^3 \\ &\approx 287,259 \text{ m} \end{aligned} \quad (\text{A12})$$

$$b_3 = 1,018 \text{ m/s}^2 + 0,046 \text{ m/s}^2 = 1,064 \text{ m/s}^2 \quad (\text{A13})$$

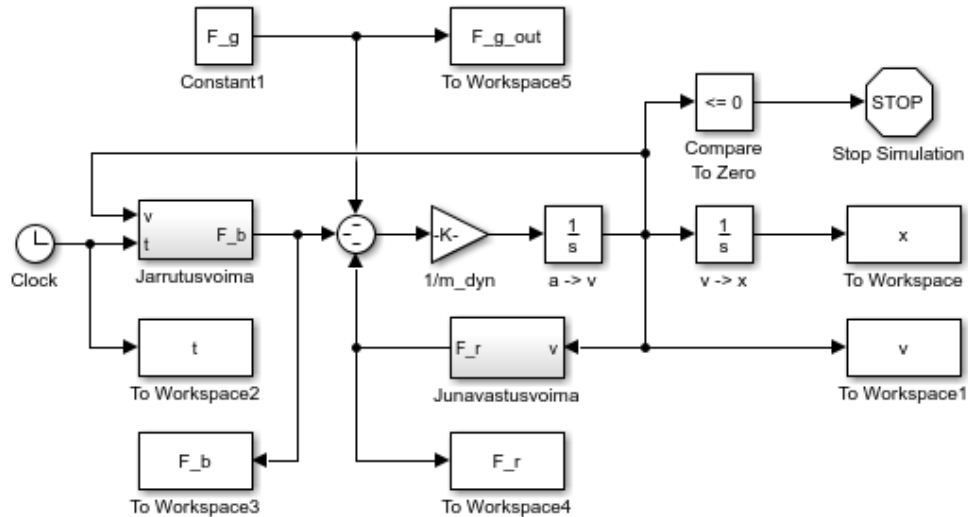
$$x_3 = \frac{(46,689 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 1,064 \text{ m/s}^2} \approx 1024,372 \text{ m} \quad (\text{A14})$$

$$s = 49,977 \text{ m} + 287,259 \text{ m} + 1024,372 \text{ m} \approx \boxed{1362 \text{ m}} \quad (\text{A15})$$

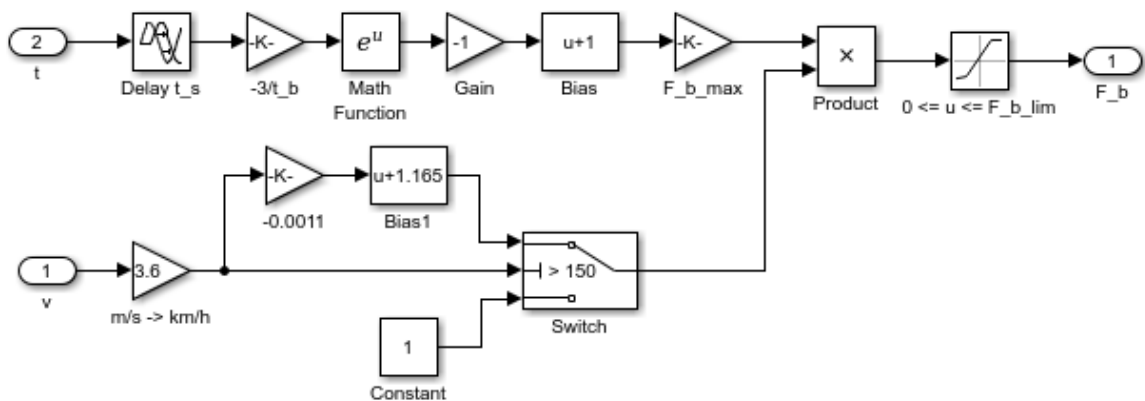
Tässä esimerkissä laskutoimitus on suoritettu välipyöristyksiä käyttäen. Pyöristämättömillä arvoilla pysähtymismatkaksi saadaan 1361 m.

B Simulaatiomallin tarkempi kuvaus

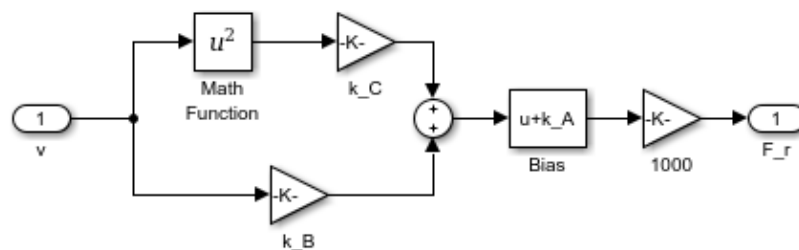
Tässä liitteessä esitellään yksityiskohdat työssä käytetystä, luvussa 5.1.5 esitellystä simulaatiomallista. Työssä käytetyn Simulink-mallin kaavio:



Jarrutusvoima-alijärjestelmän kaavio:



Junavastusvoima-alijärjestelmän kaavio:



Seuraavaksi on esitetty MATLAB-skripti, jonka avulla simulaatiomallia käytettiin.

```

% Kokoonpanovektoreiden alustus
m = [];
b = [];
l = [];
rho = [];
name = [];
n = 0;

% Lähtönopeus
v_0_kmh = 200;

% Jarrupainoprosentti
lambda = 140;

% Salli korkeampi jpp kuin kaluston maksimi? 1 = kyllä, 0 = ei
allow_high_lambda = 0;

% Onko kyseessä Sm3 tai Sm6? 1 = kyllä, 0 = ei
emu = 0;

% Onko junassa kaksikerrosvaunu(ja)? 1 = kyllä, 0 = ei
ddc = 1;

% Junan kokoonpanon määrittely
m=[m 84];b=[b 108];l=[l 19];rho=[rho 1.15];name=[name 'Sr2'];n=n+1;
m=[m 63];b=[b 86];l=[l 26.5];rho=[rho 1.04];name=[name '+Ed'];n=n+1;
m=[m 63];b=[b 86];l=[l 26.5];rho=[rho 1.04];name=[name '+Ed'];n=n+1;
m=[m 60];b=[b 84];l=[l 26.5];rho=[rho 1.04];name=[name '+Edfs'];n=n+1;
m=[m 62];b=[b 86];l=[l 26.5];rho=[rho 1.04];name=[name '+ERd'];n=n+1;
m=[m 63];b=[b 84];l=[l 26.5];rho=[rho 1.04];name=[name '+Edb'];n=n+1;
m=[m 66];b=[b 90];l=[l 27.4];rho=[rho 1.04];name=[name '+Edo'];n=n+1;

% Staattinen massa
m_st = sum(m) * 1000;

% Dynaaminen massa
m_dyn = sum(m(:).*rho(:)) * 1000;
rho_T = m_dyn / m_st;

% Jarrupaino
if allow_high_lambda == 1
    B = m_st * lambda / 100;
else
    if lambda > sum(b)/sum(m)*100
        B = sum(b) * 1000;
    else
        B = m_st * lambda / 100;
    end
end

```

```

        end
    end
    lambda = B / m_st * 100;

    % Pituus
    L = sum(l);

    % Akseliluku
    n_ax = n * 4;

    % Maksimijarrutusvoima
    F_b_max = B / 1.18;

    % Jarruvoiman kehittymisaika
    if emu == 1
        t_b = 4;
    else
        t_b = 4 + L / 80;
    end

    % Järjestelmäviive
    t_s = 1;

    % Junavastusvoiman kertoimet
    k_A = sqrt(m_st * n_ax) / 1000;
    k_B = 3.6e-7 * m_st;
    if emu == 1
        k_C = 0.1296 * (10e-4 * 11.5 + 25e-6 * 10.5 * L);
    else
        if ddc == 1
            k_C = 0.1296 * (20e-4 * 14.5 + 25e-6 * 12 * L);
        else
            k_C = 0.1296 * (20e-4 * 11.5 + 25e-6 * 10.5 * L);
        end
    end

    end

    % Vakioputoamiskiihtyvyys
    g = 9.81;

    % Radan pituuskaltevuus
    i = -15;

    % Radan kallistuskulma
    theta = atan(i / 1000);

    % Gravitaatiovoima
    F_g = m_st * g * sin(theta);

```

```

% Käytettävissä oleva kitkakerroin kiskon ja pyörän välillä
alpha = 1;

% Suurin sallittu jarrutusvoima
F_b_lim = alpha * m_st * g;

% Lähtönopeuden muunnos
v_0 = v_0_kmh / 3.6;

% Simulointi
sim('dippa_malli6',1000)

% Kokonaisvoima
F_T = F_b + F_g_out + F_r;

% Kaaviot
figure
plot(x, v*3.6)
grid on
axis ([0, x(end), 0, 220])
xlabel('x [m]')
ylabel('v [km/h]')

figure
a_b = F_b / m_dyn;
a_r = F_r / m_dyn;
a_g = F_g_out / m_dyn;
a_T = F_T / m_dyn;
plot(t, a_b)
hold on
plot(t, a_g)
plot(t, a_r)
plot(t, a_T)
grid on
axis ([0, t(end), -0.2, 0.9])
xlabel('t [s]')
ylabel('b [m/s^2]')
legend('b_b', 'b_g', 'b_r', 'sum(b)', 'Location', 'East')

% Varoetäisyys ja jarrutuskäyrät
s_0 = min([10+5*v_0, 200]);
s_C = x(end) + s_0;
s_B = s_C + 4 * v_0;
s_A = s_B + 4 * v_0;

% Tulostus

```

```

disp('-----')
disp(['Junan kokoonpano: ', name])
disp(['Jarrupainoprosentti: ', num2str(lambda)])
disp(['Lähtönopeus: ', num2str(v_0_kmh), ' km/h'])
disp(['Pituuskaltevuus: ', num2str(i), ' promillea'])
disp(['Pysähtymisaika: ', num2str(t(end)), ' s'])
disp(['Todellinen pysähtymismatka: ', num2str(round(x(end))), ' m'])
disp(['Kehotus: ', num2str(round(s_A)), ' m'])
disp(['Varoitus: ', num2str(round(s_B)), ' m'])
disp(['Käyttäj. aloitus: ', num2str(round(s_C)), ' m'])

```

Esimerkki skriptin tulosteesta on esitetty alla. Lisäksi skripti tuottaa luvussa 5.1.5 esitellyt kuvaajat.

```

Junan kokoonpano: Sr2+Ed+Ed+Edfs+ERd+Edb+Edo
Jarrupainoprosentti: 135.3579
Lähtönopeus: 200 km/h
Pituuskaltevuus: -5 promillea
Pysähtymisaika: 54.995 s
Todellinen pysähtymismatka: 1596 m
Kehotus: 2240 m
Varoitus: 2018 m
Käyttäj. aloitus: 1796 m

```